



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV AUTOMATIZACE A MĚŘICÍ TECHNIKY

DEPARTMENT OF CONTROL AND INSTRUMENTATION

ROZŠÍŘENÁ REALITA PRO PRŮMYSL 4.0

AUGMENTED REALITY FOR INDUSTRY 4.0

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Tomáš Kruták

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

prof. Ing. Luděk Žalud, Ph.D.

BRNO 2020

Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor **Kybernetika, automatizace a měření**

Ústav automatizace a měřicí techniky

Student: Bc. Tomáš Kruták

ID: 152796

Ročník: 2

Akademický rok: 2019/20

NÁZEV TÉMATU:

Rozšířená realita pro Průmysl 4.0

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Cílem práce je vyvinout systém, který pomocí tzv. brýlí pro virtuální nebo rozšířenou realitu zobrazí stav výrobní linky v reálném nebo simulovaném prostředí.

1. Seznamte se s pojmy virtuální a rozšířená realita, Průmysl 4.0 a digitální dvojče.
2. Seznamte se s optickými lokalizačními systémy Optitrack a Vicon a brýlemi pro virtuální a rozšířenou realitu - zaměřte se především na Epson Moverio. Prostudujte a srovnajte také brýle/helmy značek Microsoft, Oculus, HTC, apod.
3. Vyberte vhodný framework pro zobrazování 3D objektů do brýlí rozšířené reality, zaměřte se především na Unity 3D v prostředí MS Windows a programovací jazyk C#.
4. Navrhněte a vypracujte programové řešení, které na základě pozice a orientace operátora zjištěné na základě optického lokalizačního systému (nebo jeho simulace, včetně nastavitelné lokalizační chyby) zobrazí odpovídající umělou scénu do průhledových brýlí.
5. Systém otestujte na reálném příkladě. Pokud po konzultaci s vedoucím diplomové práce nebude možné otestování na reálném zařízení, proveďte jej formou simulace ve virtuální realitě.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

Bourdot, P., Virtual Reality and Augmented Reality, LNCS11162, 2018, London

Termín zadání: 3.2.2020

Termín odevzdání: 1.6.2020

Vedoucí práce: prof. Ing. Luděk Žalud, Ph.D.

doc. Ing. Václav Jirsík, CSc.
předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

ABSTRAKT

Náplní této diplomové práce, je seznámit se s možnostmi a principy virtuální a rozšířené reality, zejména ve vztahu pro použití v továrnách Průmyslu 4.0. Seznámit s optickými lokalizačními systémy VICON a OptiTrack. Dále prostudovává možnosti 3D vizualizace technických objektů pomocí průhledových brýlí a vybrat vhodný framework pro tvorbu aplikace rozšířené reality se zaměřením na prostředí MS Windows, engine UNITY 3D a programovací jazyk C#. Následně poté je v práci navrženo a vypracováno programové řešení zobrazující umělou scénu do průhledových brýlí.

ABSTRACT

The goal of this diploma thesis is to explore possibilities and principals of virtual and augmented reality, especially in relation to use in the factories of Industry 4.0. Introduce also a optical location systems VICON and OptiTrack. . It also studies the possibilities of 3D visualization of technical objects using viewing glasses and selects a suitable framework for creating an augmented reality focused on the environment of MS Windows, UNITY 3D engine and the C# programming language. Last chapter designs and developes software solution depicting an artificial scene in viewing glasses.

KLÍČOVÁ SLOVA

Průmysl 4.0, Rozšířená realita, VICON, OptiTrack, UNITY 3D

KEYWORDS

Industry 4.0, Augmented Reality, VICON, OptiTrack, UNITY 3D

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

KRUTÁK, Tomáš. *Rozšířená realita pro Průmysl 4.0* [online]. Brno, 2020 [cit. 2020-05-30]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/127086>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav automatizace a měřicí techniky. Vedoucí práce Luděk Žalud.

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

„Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma Rozšířená realita pro Průmysl 4.0 jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne 31.5.2020

.....

Bc. Tomáš Kruták

PODĚKOVÁNÍ

Na tomto místě bych rád vyjádřil poděkování vedoucímu prof. Ing. Lud'kovi Žaludovi, Ph.D. za pomoc a věnovaný čas při tvorbě této diplomové práce. Dále bych chtěl poděkovat celé rodině a blízkému okolí, které mi svou ochotou a trpělivostí vytvořili ideální podmínky pro dokončení práce.

V Brně dne 31.5.2020

.....
Bc. Tomáš Kruták

Obsah

1	ÚVOD.....	17
2	PRŮMYSL 4.0	19
2.1	PŮMYSLOVÉ REVOLUCE	19
2.1.1	INTERNET VĚCÍ	20
2.2	UVEDENÍ PRŮMYSLU 4.0 A JEHO NÁSTROJE.....	21
2.2.1	SYTÉMOVÁ INTEGRACE	21
2.2.2	VELKÁ DATA (BIG DATA)	21
2.2.3	AUTONOMNÍ ROBOTY.....	22
2.2.4	KOMUNIKAČNÍ INFRASTRUKTURA.....	23
2.2.5	DATOVÁ ÚLOŽIŠTĚ A CLOUDOVÉ SYSTÉMY	23
2.2.6	ADITIVNÍ VÝROBA	23
2.2.7	ROZŠÍŘENÁ REALITA	24
2.2.8	SENZORY.....	24
2.2.9	KYBERNETIKA A UMĚLÁ INTELIGENCE.....	24
2.2.10	NOVÉ TECHNOLOGIE A HYPE KŘIVKA.....	25
2.2.11	DIGITÁLNÍ DVOJČE.....	27
3	TYPY REALIT	29
3.1	VIRTUÁLNÍ REALITA	29
3.1.1	HTC VIVE	31
3.1.2	OCULUS RIFT	31
3.2	ROZŠÍŘENÁ REALITA	33
3.2.1	MOVERIO EPSON.....	35
3.2.2	GLASS.....	36
3.3	MIXOVANÁ REALITA	37
3.3.1	MICROSOFT HOLOLENS	37
4	ANALÝZA OBJEKTŮ A JEJICH POHYBU.....	39
4.1	SYSTÉM VICON.....	39
4.1.1	PASIVNÍ TRIANGULACE	40
4.1.2	ROZMÍSTĚNÍ KAMEROVÉHO SYSTÉMU.....	42
4.2	SYSTÉM OPTITRACK.....	44
4.2.1	ZÁKLADNÍ INFORMACE.....	44
4.2.2	ZACHYCENÍ POHYBU	45
4.2.3	MOŽNOSTI KAMEROVÉHO NASTAVENÍ.....	48
4.2.4	SOFTWARE MOTIVE	50
4.2.5	DATOVÉ FORMÁTY.....	50
4.2.6	STREAMOVÁNÍ DAT.....	51
4.2.7	PODPORA VÝVOJOVÝCH PROSTŘEDÍ	52
4.2.8	ROZMÍSTĚNÍ KAMEROVÉHO SYSTÉMU.....	52
5	VOLBA FRAMEWORKU.....	55
5.1	VÝBĚR OPERAČNÍHO SYSTÉMU.....	55
5.1.1	MS WINDOWS 10	55
5.1.2	UBUNTU.....	56

5.2	VÝBĚR VÝVOJOVÉHO PROSTŘEDÍ	56
5.2.1	UNITY 3D	57
5.2.2	UNREAL ENGINE 4.....	59
5.2.3	CRYENGINE 5.....	59
5.2.4	ROS.....	60
5.3	VOLBA PROGRAMOVACÍHO JAZYKA	61
5.3.1	C# .NET.....	61
5.3.2	C++	62
5.3.3	JAVASCRIPT	63
5.3.4	PYTHON	65
6	VLASTNÍ ŘEŠENÍ.....	67
6.1	MODELOVÁNÍ VIRTUÁLNÍ REALITY V UNITY 3D.....	67
6.1.1	ZÁKLADNÍ PROSTORY	68
6.1.2	STATICKE PŘEDMĚTY.....	69
6.1.3	DYNAMICKE PŘEDMĚTY.....	70
6.1.4	KOSMETICKÉ PŘEDMĚTY.....	71
6.1.5	OSVĚTLENÍ	71
6.2	SCRIPTOVÁNÍ	72
6.2.1	KOMUNIKACE	73
6.2.2	OPERÁTOR.....	73
6.2.3	DRON	75
6.2.4	DVEŘE.....	75
6.3	ZOBRAZENÍ TEXTŮ A ZMĚNA OBJEKTŮ	76
7	ZHODNOCENÍ VYTVOŘENÉ APLIKACE.....	79
8	ZÁVĚR.....	81
	LITERATURA	83
	SEZNAM PŘÍLOH	87

Seznam obrázků

Obr. 1: Čtyři průmyslové revoluce	19
Obr. 2: Schéma internetu věcí	21
Obr. 3: Schéma velkých dat	22
Obr. 4: Kooperativní aditivní výroba	24
Obr. 5: Autonomní robot v automobilové továrně firmy Seat	25
Obr. 6: Hype křivka pro rok 2018	27
Obr. 7: Digitální dvojče je identická digitální kopie reálného zřízení	28
Obr. 8: Ukázka virtuální reality - Clutch VR Driving Simulator	30
Obr. 9: HTC VIVE Pro, dva ovladače, dvě základny	31
Obr. 10: Oculus Rift, dva dálkové ovladače.....	32
Obr. 11: Příklad využití AR.....	34
Obr. 12: Brýle MOVERIO BT-350.....	36
Obr. 13: Google GLASS Enterprise	37
Obr. 14: Microsoft HoloLens.....	38
Obr. 15: Kamera Vicon Vantage	40
Obr. 16: Princip stereoskopických snímků.....	41
Obr. 17: Stereoskopie – epipolární linie	42
Obr. 18: Rozmístění kamerového systému pro místnost 8×8×3 metrů.....	43
Obr. 19: Rozmístění kamerového systému pro místnost 16×16×3 metrů	43
Obr. 20: Náhled sestavy systému OptiTrack.....	44
Obr. 21: Typ rigid body markeru X-base Marker - 14 mm	45
Obr. 22: Příklad rozmístění markerů pro aplikaci běh člověka.....	46
Obr. 23: Ukázka rozmístění markerů pro detailní snímání obličeje.....	47
Obr. 24: Kamera OptiTrack Prime ^x 41	48
Obr. 25: Snímání člověka a důsledky nastavení délky expozice.....	49
Obr. 26: Náhled do prostředí MOTIVE:Body.....	50
Obr. 27: Síťová sada NatNet SDK typu klient/server	51
Obr. 28: 4 OptiTrack kamery, snímáný prostor max. 5x5x2 m.....	52
Obr. 29: 20 OptiTrack kamer, snímáný prostor max 12x12x5 m	53
Obr. 30: Minimální požadavky Windows 10.....	56
Obr. 31: Minimální požadavky Ubuntu pro nejnovější verze 17.10 až 20.04	56
Obr. 32: Výběr 3D objektů v Unity 3D	57
Obr. 33: Model hodin vytvořených pomocí modelovacích nástrojů Unity 3D.....	57
Obr. 34: Náhled na vývojové prostředí Unity 3D	58
Obr. 35: Náhled na vývojové prostředí Unreal Engine 4.....	59
Obr. 36: Náhled na vývojové prostředí CryEngine 5	60
Obr. 37: Náhled na vývojové prostředí RViz v rámci frameworku ROS [39]	61

Obr. 38: Seznam assetů tvořící základní strukturu programu.....	67
Obr. 39: Seznam objektů tvořící stěny.....	68
Obr. 40: Základní konstrukce výrobní haly (bez stropu) pro virtuální realitu	69
Obr. 41: Seznam prvků výrobní linky a beden v hale	69
Obr. 42: Výrobní hala po nahrání statických předmětů	70
Obr. 43: Model pozorovacího dronu s kamerou ve spodní části těla	70
Obr. 44: Náhled do odpočinkové místnosti	71
Obr. 45: Ukázka žlutého světla v odpočinkové místnosti	72
Obr. 46: Ukázka modrého světla v provozní hale	72
Obr. 47: Seznam scriptů pro ovládání headsetu <i>Moverio BT-300</i>	73
Obr. 48: Defaultní nastavení ovládání pro virtuální realitu.....	74
Obr. 49: Metoda <i>Update()</i> ze scriptu Pohyb	74
Obr. 50: Metoda <i>Update()</i> ze scriptu MouseLook.....	75
Obr. 51: Metoda <i>Update()</i> ze scriptu PohybWaypoint	75
Obr. 52: Metoda <i>Update()</i> ze scriptu DvereOpen	76
Obr. 53: Pohled operátora před spuštěním scriptů TextTrigger	77
Obr. 54: Pohled operátora po spuštěním scriptů TextTrigger.....	77
Obr. 55: Ukázka textů informujících o poloze, datu a čase	78
Obr. 56: Náhled na všechny objekty v rámci aplikace pro virtuální realitu	80

Seznam tabulek

Tab. 1:	Minimální hardwarové požadavky počítače pro chod VR.....	33
Tab. 2:	Doporučené hardwarové požadavky počítače pro chod VR.....	33
Tab. 3:	Podrobný popis programovacího jazyka C# .NET.....	62
Tab. 4:	Podrobný popis programovacího jazyka C++	63
Tab. 5:	Podrobný popis programovacího jazyka JavaScript.....	64
Tab. 6:	Podrobný popis programovacího jazyka Python.....	66

1 ÚVOD

Rozšířená realita a její implementace je v dnešní době jedno z hlavních témat při vývoji technologií a jejich aplikací pro Průmysl 4.0. Náplní diplomové práce zaměřené na rozšířenou realitu pro Průmysl 4.0 bylo provést rešerši těchto technologií a vyvinout aplikaci pro brýle rozšířené reality.

Práce v první kapitole podrobně rozebírá význam termínu průmysl 4.0, jak, kdy a proč byl uveden. Dále se soustředí na nástroje, které využívá. Jde především o nástroje typu digitální dvojče, internet věcí, rozšířená realita nebo autonomní roboti.

Dalším tématem je virtuální, rozšířená a mixovaná realita. Zde je rozebráno, jakým způsobem se tyto reality rozlišují, jak je k nim přistupováno z pohledu Průmyslu 4.0, jaké jsou jejich možnosti a také praktické využití. Na každou z výše zmíněných realit se zaměřují různé společnosti uvádějící na trh nejrůznější headsety pro jejich využití. Práce se snaží vybrat ty nejdůležitější z nich a zhodnotit jejich kvalitu a možnosti využití. Největší důraz je kladen na headset MOVERIO, jenž bude sloužit pro následný vývoj aplikace.

V kapitole analýza objektů a jejich pohybu je rozebíráno co jsou a jak fungují motion capture kamerové systémy. Je rozebírán fyzikální princip pasivní triangulace, na kterém tyto kamery pracují. Práce se zaměřuje na dva konkrétní kamerové systémy, a to VICON a OptiTrack. Sledovací systém VICON se nachází v laboratoři Průmyslu 4.0 na VUT a je součástí praktického řešení. Systém OptiTrack je rozebírán především po technické a funkční stránce.

Poslední kapitola rešeršní části rozvíjí téma, v jakém frameworku bude vyvíjena aplikace rozšířené reality pro praktickou část práce. Jsou prozkoumány možnosti využití operačních systémů Windows 10 a Ubuntu. Dále se provádí výběr vývojového prostředí, enginu, který bude využit pro tvorbu aplikace. Především se práce zaměřuje na herní engine UNITY 3D. V posledním kritériu, kterým je výběr vhodného programovacího jazyka, se klade důraz na to, aby aplikace byla robustní a kompatibilní s kamerovým systémem snímání pohybu a také s headsetem pro rozšířenou realitu MOVERIO.

Vlastní řešení popisuje vytváření aplikace pro průhledové brýle plnící funkci asistenta operátora. Jejím hlavním cílem je, aby byl operátor užívající průhledové brýle informován o stavech objektů či strojů v jejich blízkosti se nachází. Aby byla vizualizace aplikace přehledná, bylo potřeba nastavit dynamické zobrazování informací, které se ukážou pouze při bližší interakci s daným objektem. Jelikož nebylo možné aplikaci otestovat na reálném systému, byla pro tyto potřeby upravena z rozšířené reality do virtuální reality. Proto práce obsahuje také popis vývoje umělé scény a jak se tvořily jednotlivé statické či dynamické assety. Nástroje pro tento vývoj byly vybrány podle rešerši zpracovaných v následujících kapitolách.

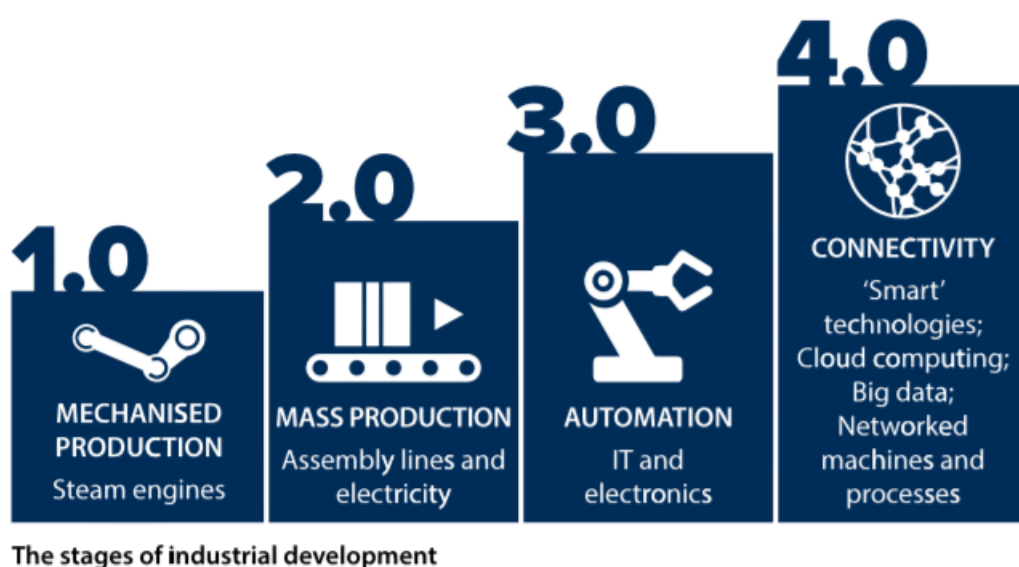
2 PRŮMYSL 4.0

Průmysl 4.0 je dnes hojně rozšířený a užívaný pojem. Pro lepší pochopení, co tento termín představuje, je potřeba se podívat hlouběji do historie. Již od začátku industrializace vedou technologické skoky k posunům paradigmat, které jsou dnes známy jako průmyslové revoluce. Za více než 250 let proběhlo už několik průmyslových revolucí.

2.1 PŮMYSLOVÉ REVOLUCE

První průmyslová revoluce proběhla v letech 1760 až 1830. Její podstata spočívala v nahrazení ruční práce mechanizovanou výrobou. To umožnily první stroje poháněné parní energií, a to zejména v textilním průmyslu. Díky této mechanizaci vznikly nové požadavky na dovednosti pracovní třídy a současně i specializované pracovní pozice, které obsadili nově kvalifikovaní pracovníci, takzvaní specialisté.

Druhá průmyslová revoluce měla o poznání kratší trvání a udála se přibližně v letech 1840 až 1870. Tato revoluce se nesla v duchu elektrizace průmyslu. Jedním z klíčových vynálezů této doby byla například žárovka. Dalším charakteristickým rysem byl rozmach železnice a rapidní výstavba železničních sítí, to umožnilo náhlé, několikanásobné zvýšení těžby železné rudy. Rozsáhlé železniční sítě pomohly rapidní expanzi jak pracovní síly, tak hlavně zboží. Začaly též vznikat první automatizované linky, které byly začátkem masivní výroby. [10] [11]



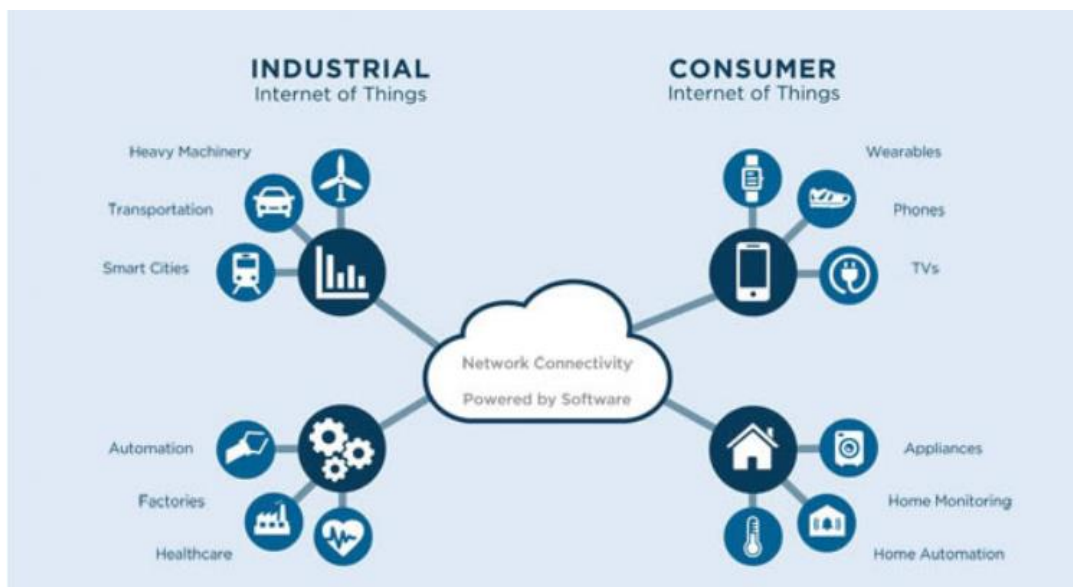
Obr. 1: Čtyři průmyslové revoluce [11]

Rozmach digitálních technologií, zejména počítačů, v letech 1950-1970 se prezentuje jako třetí průmyslová revoluce. K této revoluci také velkou měrou přispěl rozmach komunikačních technologií. Období lze nazvat i bránou do „informačního věku“. Nedílnou součástí bylo zavádění průmyslových robotů do výroby. Díky vývoji softwaru bylo možno zefektivnit výrobu. Vznikaly i první programy k plánování procesů. [10] [11]

Na základě pokročilé digitalizace v továrnách se zdá, že kombinace internetových technologií a technologií orientovaných na budoucnost v oblasti „inteligentních“ objektů (strojů a výrobků) vede k novému zásadnímu posunu paradigmatu v průmyslové výrobě. Vize budoucí výroby obsahuje modulární a efektivní výrobní systémy a charakterizuje scénáře, ve kterých produkty řídí svůj vlastní výrobní proces. Používání digitálních počítačů, telefonů, tabletů, PLC, nebo také cloudových úložišť pomáhá formovat nový technologický směr, který pravděpodobně vyvrcholí ve čtvrtou průmyslovou revoluci, dnes také nazývanou jako Průmysl 4.0. Ta by měla reprezentovat technologickou výzvu v integraci kyberneticko-fyzických systémů (Cyber-Physical Systems - CPS), které budou připojeny prostřednictvím digitálních průmyslových sítí a navzájem komunikovat v průmyslovém prostředí. CPS lze chápat jako inteligentní prvky v internetu věcí. [10] [11]

2.1.1 INTERNET VĚCÍ

V informatice se termín internet věcí (Internet of Things – IoT) používá pro označení sítě fyzických zařízení, vozidel, domácích spotřebičů a dalších mechanismů, vybavených elektronikou, softwarem, senzory, pohyblivými částmi a síťovou konektivitou. Síť IoT umožňuje těmto zařízením propojit se a vyměňovat si různorodá data. Každé zařízení je v síti jasně identifikovatelné díky implementovanému softwaru a dokáže pracovat jak samostatně, tak v kooperaci s jinými zařízeními v existující infrastruktuře internetu. Přibližné odhady zainteresovaných expertů jsou takové, že v roce 2020 bude internet věcí zahrnovat až 30 miliard zřízení. [12]



Obr. 2: Schéma internetu věcí [12]

2.2 UVEDENÍ PRŮMYSLU 4.0 A JEHO NÁSTROJE

Vznik termínu Průmysl 4.0 a jeho představení veřejnosti proběhlo na veletrhu Hannover Fair 2011. Tato iniciativa vzešla od německé vlády, která tímto pojmem definovala strategii pro budoucnost německého podnikání. Iniciativa nese název „High-Tech Strategy 2020 for Germany“ a bude výzvou v pěti oblastech: klima/energie, zdraví/výživa, komunikace, mobilita a bezpečnost. [13] [14]

2.2.1 SYTÉMOVÁ INTEGRACE

Jedná se o zajišťování koncepčního přístupu k logice výrobních a logistických faktorů a také sdílení dat mezi podniky. V praxi se v rámci podniků využívá informačních systémů jako je EDI (Electronic Data Interchange), což je elektronická výměna dat, díky níž probíhá optimalizace procesů dodavatele. Dále také využívání ERP (Enterprise Resource Planning), tedy systému, který se zaměřuje optimální plánování podnikových zdrojů a systém CRM (Customer Relationship Management) se zaměřením na řízení vztahů s koncovými zákazníky. Dalším systémem určeným pro systémovou integraci je RDIF (Russian Direct Investment Fund), který se používá pro sledování stavu zásob, pohybu dílů a výrobků ve výrobních fázích životního cyklu. Cílem těchto systémů je převážně optimalizace, zvýšení efektivity a hlavně celkové usnadnění výrobních procesů. [13] [14]

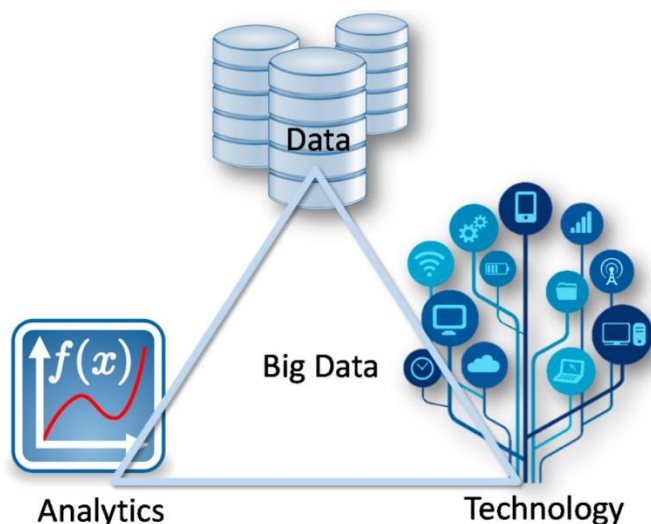
2.2.2 VELKÁ DATA (BIG DATA)

Objem dat, která se dnes zpracovávají, exponenciálně narůstá a s tím narůstá i potenciální využití informací v nich obsažených. Cena jejich získávání naopak ve většině oblastí klesá. Schopnost získávat tyto praktické informace je však zatím

značně omezená a spousta užitečných dat zůstává bez jakéhokoliv využití. Významnějšímu pokroku v této oblasti zatím brání některé zásadní vědecké nedostatky v oblastech matematiky, informatiky, a také nedostatky personální kapacity příslušných odborníků. [13] [14]

Zdroje velkých dat jsou různorodé a získávají se z čidel sledujících výrobní procesy, logistiku výrobních závodů, inteligentních senzorů měřících sítě, CRM systémů, dále také ze satelitního pozorování, teleskopů, bezpečnostních kamer a podobně. Zdrojem však mohou být například i sociální sítě. [14]

Zpracování a využití velkých dat v průmyslu slouží především k optimalizaci vlastní výroby a služeb s ní souvisejících, jako je distribuce výrobků. Slouží také k digitální konstrukci podniků a simulaci výrobních linek. V praxi se v oblasti optimalizace a distribuce používá skladových senzorů a propojení konkrétních dopravních prostředků s okolím. Analýza velkých dat z těchto senzorů zahrnuje informace o spotřebě, prostojích, opotřebení strojů apod. Pomáhá také zvyšovat dostupnost materiálu na základě výroby a snižuje celkové náklady na výrobu a údržbu. [14]



Obr. 3: Schéma velkých dat [23]

2.2.3 AUTONOMNÍ ROBOTY

Využití autonomních robotů se týká převážně oblasti hromadné výroby, kde představují významný prostředek pro zvýšení produktivity. V současnosti se ve výrobních linkách nachází velice specializované roboty se specifickými úkony v rámci výrobního procesu. Nejsou univerzální a mají omezenou nebo žádnou inteligenci. Existuje však snaha roboty nahradit více univerzálními jednotkami, které mohou provádět různorodé úkony. Tyto stroje však zatím nejsou běžnou záležitostí, a to hlavně díky vysoké pořizovací ceně a nedostatku kvalifikovaného personálu pro jejich obsluhu. V dnešní době se snaží o využití těchto robotů převážně automobilové továrny. [14]

2.2.4 KOMUNIKAČNÍ INFRASTRUKTURA

Termínem komunikační infrastruktura je myšleno využívání komunikačních sítí. Zejména se jedná o vysokorychlostní a ultrarychlostní bezdrátové, kabelové a optické sítě. V souvislosti s bezdrátovými sítěmi se mluví především o sítích čtvrté a páté generace. Rozsáhlá komunikační síť založená na nejnovějších technologiích je stavebním kamenem pro implementaci Průmyslu 4.0. Rychlých sítí využívá především internet věcí, kde je nutné propojit stále větší počet zařízení, které mají vysoké požadavky na spolehlivost a latenci. Jejich důležitost se také ukazuje při řešení problematiky velkých dat, vzdálených a cloudových úložišť. [14]

V oblasti internetu věcí se mluví i o propojení zařízení pomocí M2M (Machine to Machine), tento systém označuje přímou komunikaci mezi zařízeními používajícími jakýkoliv komunikační kanál, včetně kabelových a bezdrátových sítí. Komunikace M2M může zahrnovat průmyslové vybavení umožňující senzorům nebo měřicím přístrojům sdělovat údaje, které zaznamenávají, jako jsou teplota či úroveň zásob. Tyto údaje odešle do aplikačního softwaru, jenž je může použít například k nastavení průmyslového procesu založeného na teplotě nebo zadávání příkazů k doplnění inventáře. [14]

2.2.5 DATOVÁ ÚLOŽIŠTĚ A CLOUDOVÉ SYSTÉMY

Datová úložiště neboli datacentra a cloudové systémy, umožňují uživateli ukládat velké množství dat bez nutnosti vlastnit a provozovat vlastní výpočetní techniku k tomu určenou. Společně se vzrůstajícími požadavky na uložení velkého souboru dat, rostou také nároky na jejich rychlé a bezpečné zpracování. Datová centra, která se zabývají ukládáním na vzdáleném serveru, dokážou nabídnout také řadu jiných služeb: poskytování softwaru jako služby (SaaS – Software as a Service), poskytování platformy jako služby (poskytování HW a SW), ale také poskytování samotného výpočetního výkonu pro specializované aplikace, které potřebují provádět náročné komplexní výpočty. Využívání cloudových řešení má kladné dopady na rozvoj firem. Pomáhá růstu produktivity a optimalizuje náklady na IT. A to nejen u velkých firem, ale také středních a malých podniků, pro které je budování vlastních výpočetních center ekonomicky nevýhodné. Využívání cloudových služeb je vhodné i pro firmy, které potřebují velké výpočetní kapacity jen narázově. [13] [14]

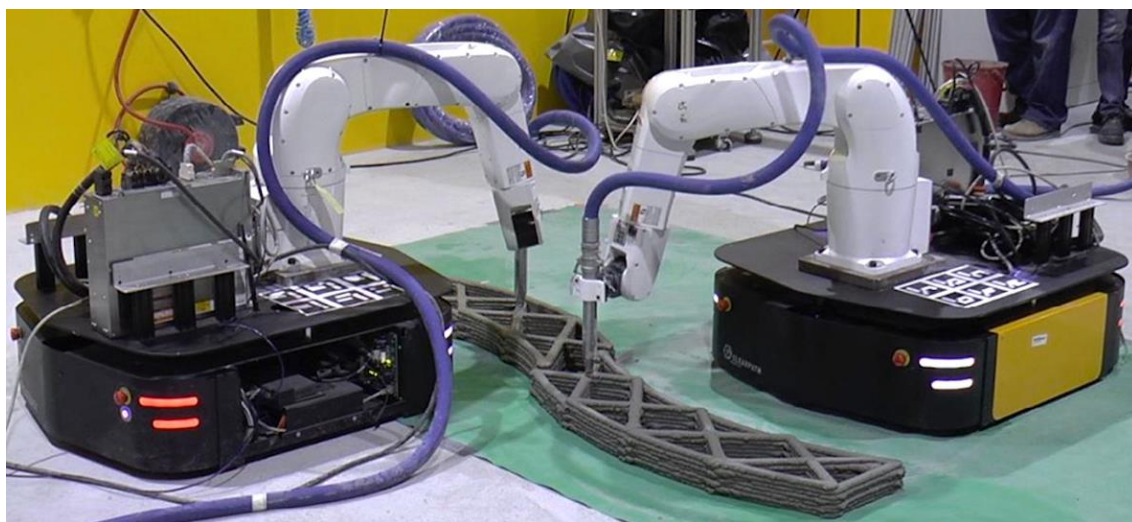
Využívání těchto služeb s sebou přináší zvýšené nároky na kvalitu internetového připojení. Značně zvyšují i bezpečnostní požadavky na datový přenos a šifrování dat. Rozvoj tohoto odvětví tak musí jít ruku v ruce s rozvojem technologií kybernetické bezpečnosti. [14]

2.2.6 ADITIVNÍ VÝROBA

Aditivní výroba označuje typ výrobní metody, kde výrobek vzniká postupným nanášením tenkých vrstev materiálu na sebe. Tato metoda je v podstatě totožná s 3D

tiskem. Pojmy se liší pouze tím, že u 3D tisku se vytváří pouze prototyp, kdežto aditivní výrobou je označován proces, při němž vzniká koncový produkt.

Tato výrobní technologie má značnou výhodu v možnosti nekontinuální výroby vysoce rozdílných výrobků. Jsou také dopředu známy přesné požadavky na množství potřebného materiálu. Nejrozšířenější surovinou používanou pro výrobu jsou polymery. V současnosti se čím dál více s novými technologiemi dostává do popředí 3D tisk využívající slitiny kovů. [14]



Obr. 4: Kooperativní aditivní výroba [24]

2.2.7 ROZŠÍŘENÁ REALITA

Nedílnou součástí Průmyslu 4.0 je rozšířená realita. Ta se zaměřuje především na správu výrobních procesů v továrnách, zjednodušování a ulehčování těchto procesů. Vše o rozšířené realitě je dále popsáno v kapitole 3.2.

2.2.8 SENZORY

Senzory jsou zařízení, jenž převádějí fyzikální vlastnosti prostředí na signál, který je možný využít prostřednictvím digitálních technologií. Požadavky na vývoj senzorů jsou zejména minimalizace, zvyšování přesnosti a využívání nejmodernějších materiálů. Snaha je také nalézat stále nové technologické metody měření. V oblasti Průmyslu 4.0 je nejčastěji skloňovaným termínem prediktivní diagnostika. Ta by měla umožnit propojení umělé inteligence s měřicími senzory. Výsledkem by měl být měřicí systém, který na základě dat získaných v reálném čase, dokáže predikovat možné závady na strojích dříve, než k nějakým dojde a v ideálním případě jim i zabránit. [14]

2.2.9 KYBERNETIKA A UMĚLÁ INTELIGENCE

Základním teoretickým východiskem pro organizaci a řízení složitých systémů je oblast multiagentních systémů. Jsou zde řešeny otázky autonomního chování.

Inteligentní interakce, která povede nejen k získávání a výměně dat, ale bude také v koordinaci a v kooperaci autonomních jednotek s ohledem na sdílené globální cíle. [14]

Pro řízení v reálném čase se na nejnižší úrovni řízení uplatňují reaktivní holonické řešení podle standardu IEC 61449. Ve vyšších úrovních se pak jedná většinou o klasické automatické řízení s agentními přístupy. Agenti se zde opírají o rozsáhlé soubory znalostí a jednoduché principy rozhodování. V blízké budoucnosti se očekává velký nárůst využití umělé inteligence, a to hlavně díky progresivnímu vývoji softwarových i hardwarových neuronových sítí. [14]



Obr. 5: Autonomní robot v automobilové továrně firmy Seat [25]

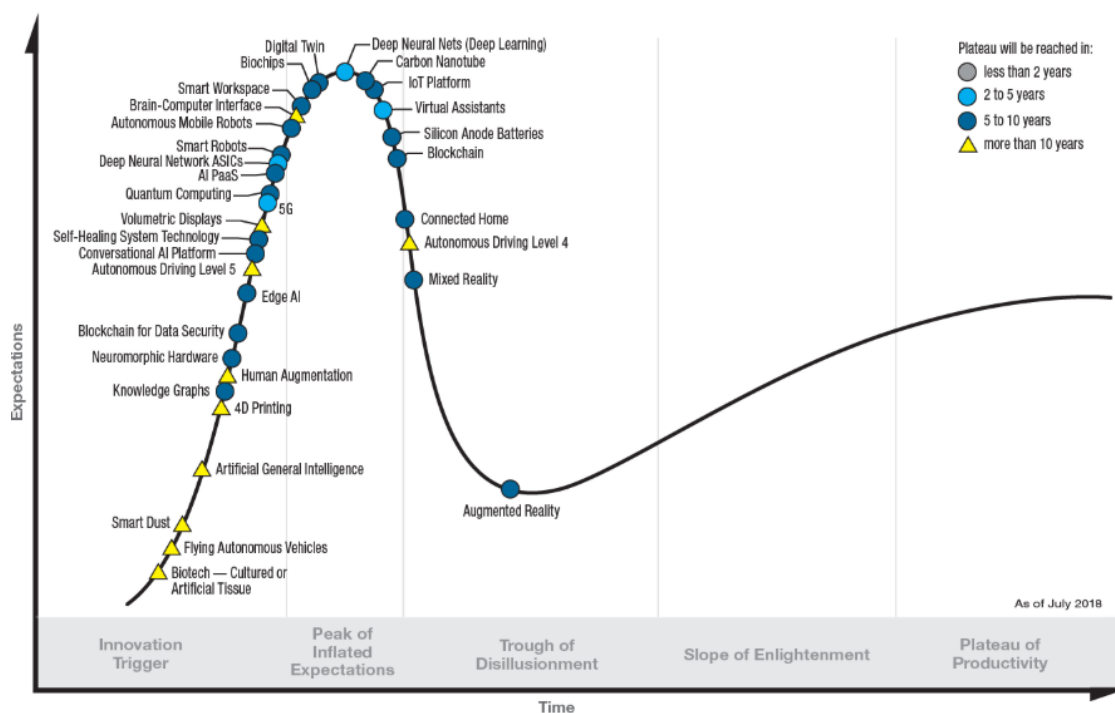
2.2.10 NOVÉ TECHNOLOGIE A HYPE KŘIVKA

Každá revoluce v průmyslu s sebou přináší nové technologie, které jsou pro ni charakteristické. Stejně jako první průmyslová revoluce se nesla ve jménu parního stroje, tak i Průmysl 4.0 má své signifikantní znaky. Společnost Gartner sestavuje každý rok křivku zvanou Hype Cycle for Emerging Technologies. Tato křivka zobrazuje neočekávanější technologie a jejich předpokládané zavedení do praxe. Lze z ní také vyčíst, jaké bude očekávání veřejnosti i odborníků ke každé technologii zvlášť. Nacházejí se v ní úplně nové technologie, ale také technologie, které postupně přestávají být středobodem sledovanosti médií (Augmented Reality), nebo se postupně stávají součástí běžné reality. V aktuální křivce už například nelze najít technologii velkých dat (Big Data), která se v mezidobě stala již obvyklou součástí lidského života a průmyslové praxe. Jako nové technologie se do křivky také

zanáší technologie takzvaného digitálního humanismu. Příkladem jsou lidsky gramotné technologie (People-Literate Technology, PLTs), které jsou schopné převádět společný jazyk do počítačové inteligence, nebo také přímá komunikace mozku s počítačem (Brain-Computer Interface). Do této kategorie lze zařadit i kryptoměny (Bitcoin, Stellar, Lightcoin) a jiné technologie digitálního byznysu, jako inteligentní domov využívající senzory a inteligentní roboty. [13] [14]

Křivka rovněž zachycuje technologie napříč jejich pěti životními fázemi. První fáze se nazývá *Spuštění inovace* (Innovation Trigger). V ní se nachází první zmínky o nových technologiích, jak k nim přistoupí média a odborná veřejnost. Ve většině případů se jedná o technologie, pro které neexistuje prototyp nebo konkrétní využití a jejich budoucnost je nejistá. Druhá fáze zobrazuje *Vrchol očekávání* (Peak of Inflated Expectations). Ta se soustředí na konkrétní technologie, které mají největší publicitu a také v mnoha případech přehnaná očekávání. Ve třetí fázi – *Žlab deziluze* (Trough of Desillusionment) zájem opadá zejména kvůli přibývajícím neúspěchům a špatné implementaci. Také dochází k deziluzi, jelikož se nedaří naplnit potenciál technologie nebo ji překonala jiná alternativní technologie. Čtvrtá fáze se nazývá *Svah poučení* (Slope of Enlightenment). Je to fáze, která je typická pro získávání hmatatelných důkazů o komerčním využití dané technologie. Poslední fáze je *Plošina produktivity* (Plateau of Productivity). Po dosažení této fáze se technologie stává využitelnou v širokém komerčním spektru. Křivka Hype Cycle for Emerging Technologies pro rok 2018 je zobrazena níže na obr. 6. [13] [14]

Hype Cycle for Emerging Technologies, 2018



Obr. 6: Hype křivka pro rok 2018 [15]

2.2.11 DIGITÁLNÍ DVOJČE

Digitální dvojče je jedním z nejvýraznějších nástrojů Průmyslu 4.0. Je to pojem, který popisuje vytvoření digitální kopie stroje paralelně ke skutečnému stroji. Tento systém dokáže dynamicky reagovat jak na požadavky výrobce, tak na požadavky zákazníka. Vývoj digitálních dvojčat musí být vysoce flexibilní, protože roste rozmanitost produktů a procesů, a je potřeba hlídat, aby výroba nebyla časově a energeticky náročnější než dříve a nesmí spotřebovat více zdrojů. Zřejmý potenciál inovací v oblasti digitalizace spočívá ve zvyšování účinnosti. A to od počátku návrhu a přípravy produktu, až po návrh výroby, uvedení do provozu, provoz a modernizaci strojních zařízení i výrobních závodů. Ve většině odvětví se při návrhu digitálního dvojčete klade velký důraz na návrh stroje jako mechatronického systému, který je možné digitálně testovat, dále rozvíjet a validovat ještě před spuštěním samotné výroby. Data ze skutečného stroje jsou nahrána do modelu již ve fázi návrhu. Je tak vytvořeno digitální dvojče, které umožňuje simulaci přepnutí provozu a toku výroby po celý životní cyklus stroje. Pomocí cloudu lze provádět hodnocení ukazatelů KPI (Key Performance Indicator), jako jsou např. počty vyrobených položek, analýza prostojů, poruchovost a energetické údaje. Pro ochranu citlivých výrobních dat jsou rozhodující také komplexní průmyslové bezpečnostní systémy. Díky nejmodernějším softwarovým nástrojům pro digitalizaci životního cyklu zařízení získá uživatel značnou flexibilitu při návrhu a provozu stroje, což je v dosavadním způsobu výroby skutečným mezníkem. Se správnými nástroji dokáže digitální

dvojče zvýšit efektivitu ve všech fázích životního cyklu stroje. Umožňuje dřívější validaci návrhu nebo testování konfigurace stroje už v přípravné fázi procesu, což snižuje riziko poruch a chyb v kritických fázích životního cyklu. [26]



Obr. 7: Digitální dvojče je identická digitální kopie reálného zřízení [27]

3 TYPY REALIT

Moderní technologie přistupují k vnímání virtuální reality různě, a proto je nutné je správně rozlišovat. Reality se rozdělují do mnoha skupin, ale většinou jde pouze o různé modifikace některého ze tří hlavních typů: virtuální realita, rozšířená realita a mixovaná realita. V následujících odstavcích bude podobně rozebráno, co si lze představit pod každým z těchto pojmů. Bude také proveden technický a funkční rozbor nejpoužívanějších zařízení, které se pro dosažení některé z uvedených realit používají.

3.1 VIRTUÁLNÍ REALITA

Definice virtuální reality (VR) vychází přirozeně z definice slov *virtuální* a *realita*. Virtuální lze volně interpretovat jako zdánlivý, potenciální či neskutečný. Pojem realita se rozumí to, co kolem vnímají lidé jakožto živé bytosti. To znamená, že pod pojmem virtuální realita si lze představit něco, co obklopuje uživatele, zdánlivě se to jeví skutečné, ale je to pouze počítačová simulace. Technicky řečeno, je to třídimensionální, počítačem generované prostředí, se kterým může uživatel interagovat. To znamená, že může vykonávat různé akce, kterými virtuální prostředí ovlivní, jako je například manipulace s objekty. Ve většině současných prostředí VR jde převážně o navození vizuálního zážitku. Ten je zobrazován buď na monitoru počítače nebo přes stereoskopické zařízení. Nejnovější simulace se snaží zapojit i některé další smyslové vjemy jako chuť, vůni nebo dotek. [1]

Ve virtuálním světě je člověk zastoupen svým vědomím neboli virtuální identitou. Virtuální identita, nebo také online identita, je soubor digitálních dat reprezentujících fyzický subjekt ve virtuálním prostředí. [2] Uživatel také dostane grafického reprezentanta nazývaného avatar.

Mezi hlavní znaky VR se řadí především co nejdokonalejší vytvoření iluze trojrozměrného prostoru. Dále je to schopnost reagovat na podněty v reálném čase, možnost uživatele reagovat s prostředím a také toto prostředí aktivně měnit a pohybovat se v něm.



Obr. 8: Ukázka virtuální reality - Clutch VR Driving Simulator [3]

VR má tři stupně. Aktivní, pasivní a interaktivní. Jako pasivní VR je označováno prostředí, kam uživatel vstoupí například čtením knih nebo sledováním filmů. Je to tedy simulace, ve které nemůže nic měnit, nic ovlivnit. Aktivním VR prostředím se myslí simulace, kde má uživatel možnost ovládat svůj pohyb a říct si, kam se vydá. Kromě možnosti pohybu zde však žádná interakce není, to znamená, že nemůže prostředí nijak formovat a zasahovat do něj. Poslední stupeň, interaktivní prostředí, umožňuje uživateli formovat simulaci kolem sebe. Může se dotýkat věcí, také brát různé předměty do rukou a pracovat s nimi. [4]

V poslední době se pro dosažení VR všeobecně používá tzv. Head Mounted Display (HMD). Jde vlastně o modifikovaný typ brýlí, kde místo skel jsou využívány většinou dva OLED displeje. Obsah do nich je dodáván pomocí PC nebo herní konzole. Součástí HMD jsou zpravidla také sluchátka, mikrofon a celá řada senzorů např. gyroskop nebo akcelerometr. Pro simulaci pohybu v prostoru se může využívat všesměrových běžecích pásů. Jako doplňky, například pro manipulaci s objekty, jsou využívány buďto speciální rukavice se schopností snímání pohybu nebo různé joysticky a ovladače.

Virtuální realita je hlavně využívána v herním průmyslu. Našla si však cestu i do oblasti vzdělávání. Využívá se třeba pro školení pilotů. Další uplatnění má zejména v architektuře nebo zdravotnictví. Pro implementaci do Průmyslu 4.0 to není nejvhodnější typ reality, a to převážně z důvodu značných finančních nákladů. Přesto existují firmy, které si VR mohou dovořit a její potenciál využívají. Jedno z hlavních uplatnění je simulování výrobních hal a jimi generovaných produktů. Do samotného provozu se však VR tolik nehodí, zde máme k dispozici lepší varianty, a to rozšířenou nebo mixovanou realitu.

3.1.1 HTC VIVE

Brýle VIVE od firmy HTC jsou dnes pravděpodobně nejlepší produkt na trhu v oblasti VR. Škála využití je široká a díky spolupráci se společností STEAM se staly jedničkou na trhu v oblasti her.

Headset se skládá z několika komponent. V první řadě je displej, který tvoří Dual AMOLED 3.5 diagonal obrazovka s rozlišením 1440×1600 pixelů na oko, respektive 2880×1600 px dohromady. Obnovovací frekvence je 90 Hz. Rozsah zorného pole je až 110°, snímání okolí je v celém rozsahu 360°. Součástí headsetu jsou také odnímatelná 3D audio sluchátka s vysokým rozlišením a mikrofon. Pro připojení jsou k dispozici porty USB-C 3.0, DisplayPort 1.2 a Bluetooth. O snímání polohy a pohybu se stará celá řada senzorů jako je G-senzor, gyroskop nebo také proximity a IPD senzor. Technické parametry brýlí patří k nejvyšší řadě VIVE Pro. K samotnému headsetu jsou také standardně dodávány dvě základny, které zaměřují polohu uživatele pomocí laserových paprsků. Dále také dva ovladače, kde každý z nich má multifunkční trackpad a 24 senzorů pro velice přesné sledování pohybu. [5]



Obr. 9: HTC VIVE Pro, dva ovladače, dvě základny [5]

3.1.2 OCULUS RIFT

Nejsilnějším konkurentem headsetu VIVE pro virtuální realitu je headset Oculus Rift od společnosti Oculus VR, která spadá do divize společnosti Facebook. Brýle jsou vybaveny OLED obrazovým panelem s rozlišením 1080×1200 px na oko při obnovovací frekvenci 90 Hz, čili 2160×1200 px celkem. Rozsah snímání okolí je 360°, zorné pole uživatele je 110°. Zvuk obstarávají 3D audio sluchátka, ty jsou odnímatelné a nahraditelné. Ze senzorů jsou zde přítomny akcelerometr, gyroskop,

úhlový senzor pro 360° určování pozice. Navíc od headsetu VIVE je součástí i magnetometr.

Pro interakci i s prostředím se používají dva ovladače Oculus Touch. Ty jsou vybaveny detekcí polohy rukou v prostoru, čtyřmi tlačítky a analogovými páčkami. Ke správnému fungování v rozsahu 360° jsou potřeba snímače Oculus, ty sledují konfiguraci infračervených LED a tím převádí pohyb do VR. Pro stoprocentní přesnost je nutné použít tři senzory. Je možnost použití i dva, ale v tom případě přesnost nelze garantovat. [6]



Obr. 10: Oculus Rift, dva dálkové ovladače [7]

Dosažení virtuální reality je výkonově náročná záležitost, proto headsety, které jsou dnes na trhu, fungují pouze jako zobrazovací nástroj. Spouštění programů obstarává jiná výpočetní technika, ať už jsou to stolní počítače, notebooky, herní konzole nebo speciálně vytvořené přenosné počítače. Minimální specifikace zobrazuje tabulka 1, doporučené tabulka 2. Níže zobrazený hardware je konkrétně pro Oculus Rift, ale téměř totožné specifikace jsou zapotřebí pro plynulý chod i u jiných zařízení využívajících VR.

Grafická karta	NVIDIA GTX 1050 Ti / AMD Radeon RX 470 nebo lepší
Alternativní grafická karta	NVIDIA GTX 960 4GB / AMD Radeon R9 290 nebo lepší
Procesor	Intel i3-6100 / AMD Ryzen 3 1200, FX4350 nebo lepší
Paměť	8 GB paměti RAM nebo více
Video výstup	Video výstup kompatibilní se specifikací HDMI 1.3
USB porty	1 port USB 3.0 a 2 porty USB 2.0
Operační systém	Windows 10 nebo novější

Tab. 1: Minimální hardwarové požadavky počítače pro chod VR [6]

Grafická karta	NVIDIA GTX 1060 / AMD Radeon RX 480 nebo lepší
Alternativní grafická karta	NVIDIA GTX 970 / AMD Radeon R9 290 nebo lepší
Procesor	Intel i5-4590 / AMD Ryzen 5 1500X nebo lepší
Paměť	8 GB paměti RAM nebo více
Video výstup	Video výstup kompatibilní se specifikací HDMI 1.3
USB porty	3 porty USB 3.0 a 1 port USB 2.0
Operační systém	Windows 10 nebo novější

Tab. 2: Doporučené hardwarové požadavky počítače pro chod VR [6]

3.2 ROZŠÍŘENÁ REALITA

Rozšířenou realitu (AR) je možno chápat jako interaktivní zkušenost v prostředí reálného světa, kde jsou reálné objekty rozšířeny počítačem generovanými vjemy v různých modalitách: vizuální, haptické, sluchové nebo čichové. Dodaný obsah do přirozeného prostředí může být konstruktivní, který přidává, vylepšuje informační obsah do reálného obrazu, nebo destruktivní, který překrývá existující stav stavem novým. Tímto způsobem rozšířená realita mění stávající vnímání prostředí skutečného světa, zatímco virtuální realita prostředí reálného světa zcela nahrazuje. [8]

Rozšířená realita se používá k posílení přirozeného prostředí a nabízí obohacující zkušenosti. Pomocí pokročilých technologií AR, například přidáváním

počítačového vidění a rozpoznávání objektů, se informace o okolním reálném světě uživatele stávají interaktivními a digitálně manipulovatelnými. Tyto informace mohou být virtuální nebo skutečné. Jako příklad lze uvést možnost vidět jiné skutečné snímané nebo měřené informace, jako jsou elektromagnetické rádiové vlny překryté přesným sladěním s tím, kde jsou skutečně v prostoru. AR probíhá v reálném čase v kontextu s environmentálním prostředím. [8]



Obr. 11: Příklad využití AR, aplikace informující o typech a lokalizaci různých obchodů [9]

Základním hardwarovým prvkem pro dosažení AR je kamera, ta je připojena k počítači nebo je součástí zařízení typu smartphone, tablet. Speciální aplikace detekuje snímanou scénu, kterou přehrává na displej a přidává doplňující informaci. Tou může být text, 2D a 3D obrazy nebo také animace, klipy, zvuky. [8]

V případě použití zařízení typu smartphone se pro orientaci v prostoru navíc využívá systém GPS, digitální kompas a připojení k internetu. Aplikace se poté dokáže v prostoru lépe orientovat a může přesněji doplnit digitální informace do skutečného obrazu. Tyto informace se většinou nachází ve velkých databázích a jsou dostupné skrze internetové připojení. [8]

Pokud je obraz snímán kamerou připojenou k počítači a je u ní absence potřebných senzorů, tak si aplikace pro AR pomáhá prostřednictvím tzv. markerů. Markery jsou speciální znaky, obrázky, na které je aplikace naučená. Při snímání scény se je kamera snaží detekovat a určit jejich polohu a orientaci. Na základě z nich získaných informací je poté obraz doplněn o digitální obsah. [8]

V posledních letech se také pro rozšířenou realitu začaly hojně využívat headsety, a to zejména brýle Moverio výrobce Epson a GLASS od společnosti Google. Zobrazování pomocí těchto headsetů se také říká kombinátor, jelikož kombinuje skleněné čočky umožňující průchod světla k očím v kombinaci s LED, popřípadě OLED displejem, který posílá očím obraz generovaný počítačem.

3.2.1 MOVERIO EPSON

První model MOVERIO brýlí se objevil v roce 2012, tehdy to byly první brýle na světě s průhlednými skly založené na platformě Android. Dnešní modely jsou svým výkonem a provedením nejlepší na trhu. Dělí se na dva typy, pro standardní užívání, kde modely mají formu klasických brýlí, a pro průmyslové užití, zde se jedná o headsety. Ty však svou velikostí ani zdaleka nedosahují rozměrů headsetů pro virtuální realitu.

Standardní rozlišení displeje u většiny modelů je 1280×720px, nebo 960×540px v zobrazeném úhlu pohledu 23 stupňů (diagonálně). Digitální obrazovka je ve virtuálním prostředí simulována v teoretické vzdálenosti 250 cm a dosahuje rozměrů až 40 palců (cca 1 m). Téměř všechna zařízení fungují na platformě Android, která má svoji vyhrazenou 1-2 GB velkou hlavní paměť. Pro nahrávání programů slouží vedlejší paměťový prostor až do výše 32 GB, některé modely mají přídatný slot pro externí microSD karty až do velikosti 32 GB. Energií brýlím dodává lithiová baterie velikosti 2950mAh, což vystačí průměrně na 6 hodin provozu při přehrávání videí, filmů. Na obr. 12 jsou zobrazeny brýle MOVERIO nejvyšší řady BT-350. [18]



Obr. 12: Brýle MOVERIO BT-350 [18]

3.2.2 GLASS

V roce 2014 měly být Google GLASS převratnou technologií v oblasti rozšířené reality, která se dostane na komerční trh. Avšak předčasné otevření trhu pro vývojáře v roce 2013, kdy brýle byly stále ještě v beta verzi, zapříčinilo, že společnost tento produkt zatím nepřijala. Výrobku uškodila negativní publicita a také zdravotní problémy uživatelů, kteří si stěžovali na bolesti hlavy, závratě a rozostřené vidění. Protože jejich velikost je prakticky stejná jako standardní sluneční nebo dioptrické brýle, měly se stát součástí každodenního využívání. To však s sebou neslo riziko ohrožení vlastního soukromí spojené s tajným nahráváním a pro mnoho odvětví podnikání byly tyto brýle doslova pohromou. Jednalo se například o kina, divadla, bary a podobná místa, kde se začaly výrazně množit zákazy používání těchto brýlí. V neposlední řadě prvotního neúspěchu byl i fakt, že pořizovací cena brýlí pro koncového zákazníka byla necelých 30 000 Kč, při výrobní ceně přibližně 1 600 Kč, tedy téměř dvacetinásobně vyšší.

Společnost Google však po tomto neúspěchu projekt AR brýlí GLASS neukončila, ale začala se soustředit pouze na trh průmyslu. Jejich vývoj neustále pokračuje, v roce 2017 se dostala na trh edice Enterprise. Oficiální technické specifikace zatím nejsou dostupné. Brýle z této edice však nejsou pro běžného spotřebitele a jsou určeny pouze pro firemní prostředí. [19] [20]



Obr. 13: Google GLASS Enterprise [19]

3.3 MIXOVANÁ REALITA

Nejnovějším pojmem v oblasti technologií umožňujícím digitálně rozšiřovat vizuální obraz je mixovaná realita (MR). Tuto technologii vycházející z rozšířené reality má na svědomí společnost Microsoft, jenž v říjnu 2017 uvedla na trh novou verzi operačního systému Windows 10, který má právě mixovanou realitu podporovat.

Hlavním rozdílem mezi MR a AR je schopnost virtuálních objektů adaptovat se v reálném prostředí. V světě MR se tak nemůže stát, že by objekty plavaly volně po obrazovce. Jako příklad lze uvést virtuální osobu, která může například chodit jen po vyznačených cestách po zemi a nestane se jí, že by chodila ve vzduchu nebo například po vodě. Systém tak pracuje s virtuálními objekty v závislosti na okolí a dokáže i měnit jejich velikost podle perspektivy vzdálenosti uživatele. [21]

3.3.1 MICROSOFT HOLOLENS

Headset HoloLens od společnosti Microsoft je v podstatě zatím jediným opravdu využívaným zařízením pro mixovanou realitu. Je to dáno převážně tím, že tento typ reality je velice mladý.

Displej headsetu je složený ze dvou HD světelných zdrojů 16:9 s celkovým počtem 2,3 milionu světelných bodů holografického rozlišení. Součástí jsou také čtyři kamery pro snímání a pochopení prostředí, jedna kamera pro snímání hloubky,

jedna standardní 2MP HD videokamera, dále čtyři mikrofony, inerciální měřicí jednotka, senzor pro snímání smíšené reality a snímač okolního světla. Nevýhodou headsetu je nízká výdrž baterie. Při aktivním užívání je to maximálně 2-3 hodiny. [22]



Obr. 14: Microsoft HoloLens [22]

4 ANALÝZA OBJEKTŮ A JEJICH POHYBU

Nedílnou součástí továren v Průmyslu 4.0 je sledování objektů v reálném čase. V první řadě se jedná o určení přesné pozice osob nacházejících se ve sledovaném prostoru nebo se také jedná o lokalizaci strojů a výrobků. Pro získávání těchto informací se používá technologie známá jako Motion Capture (Snímání Pohybu). Tento termín označuje proces nahrávání skutečného objektu a jeho převedení na digitální model. Snímání objektů se dělí na dvě kategorie podle podstaty. První se nazývá rigid body, ta zpravidla snímá tuhá tělesa, výrobní stroje nebo jejich výrobky typu rám auta, kuličky do ložiska a podobně. Druhou variantou je soft body, kterou se snímají „měkké“ objekty, což mohou být osoby nebo zvířata. Cílem této technologie je získat dostatečně velký objem dat, aby bylo možné co nejlépe zrekonstruovat pohyb objektu. V první fázi se jedná o rekonstrukci translačního pohybu a o rotaci jádra objektu. V druhé fázi se rekonstruuje translace a rotace objektů přidružených k jádru. V příkladu snímání člověka to znamená, že se nejprve zjistí pozice a orientace trupu reprezentujícího jádro, poté se zjišťuje poloha přidružených elementů, a to ve smyslu, jakým na sebe navazují. Tedy u nohy to je v pořadí stehno, lýtko a následně chodidlo. Digitální rekonstrukci pohybu lze zajistit různými metodami. Nejrozšířenější jsou optické metody čili snímání pomocí kamerového systému. Dalšími metodami jsou například snímání pomocí gyroskopů, jež jsou ve velkém počtu instalované na snímaném objektu, nebo také exoskelety.

4.1 SYSTÉM VICON

Systém VICON je jednou z optických metod, které se používají v Průmyslu 4.0. Je to výkonné řešení pro sledování objektů, především tuhých těles (rigid body), a poskytuje bezkonkurenční přesnost dat pro integraci do 3D aplikací. Pomocí kamerového systému VICON je možné sledovat pohyb objektů v šesti stupních volnosti v reálném čase a s velmi malou latencí. Princip této technologie spočívá v ideálním rozmístění kamer snímajících danou scénu z několika pohledů. Tyto kamery jsou společně se světelnými zdroji navzájem synchronizovány a vytvářejí obraz pohybujícího se objektu. Je zde využíván systém takzvané pasivní triangulace.



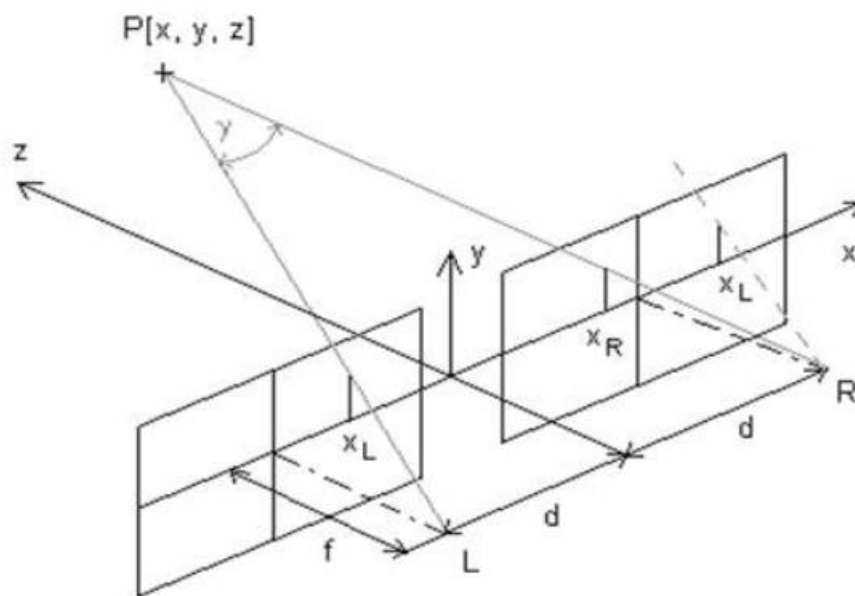
Obr. 15: Kamera Vicon Vantage [17]

4.1.1 PASIVNÍ TRIANGULACE

Pasivní triangulační techniky nejsou nic jiného než formy digitální fotogrammetrie. Pojem „pasivní“ znamená, že se neuvažuje geometrické uspořádání osvětlení. Nejčastěji používané metody pasivní triangulace jsou použití více kamer se známou orientací, více kamer se samokalibrací nebo jedna kamera v různých polohách se samokalibrací. V dynamických systémech se převážně aplikuje více kamer využívajících samokalibračních metod nebo se vychází ze znalosti jejich relativní polohy. Ve snímání statických scén je většinou dostačující využití jedné kamery, která získává snímky nejméně ze dvou a více pohledů. [16]

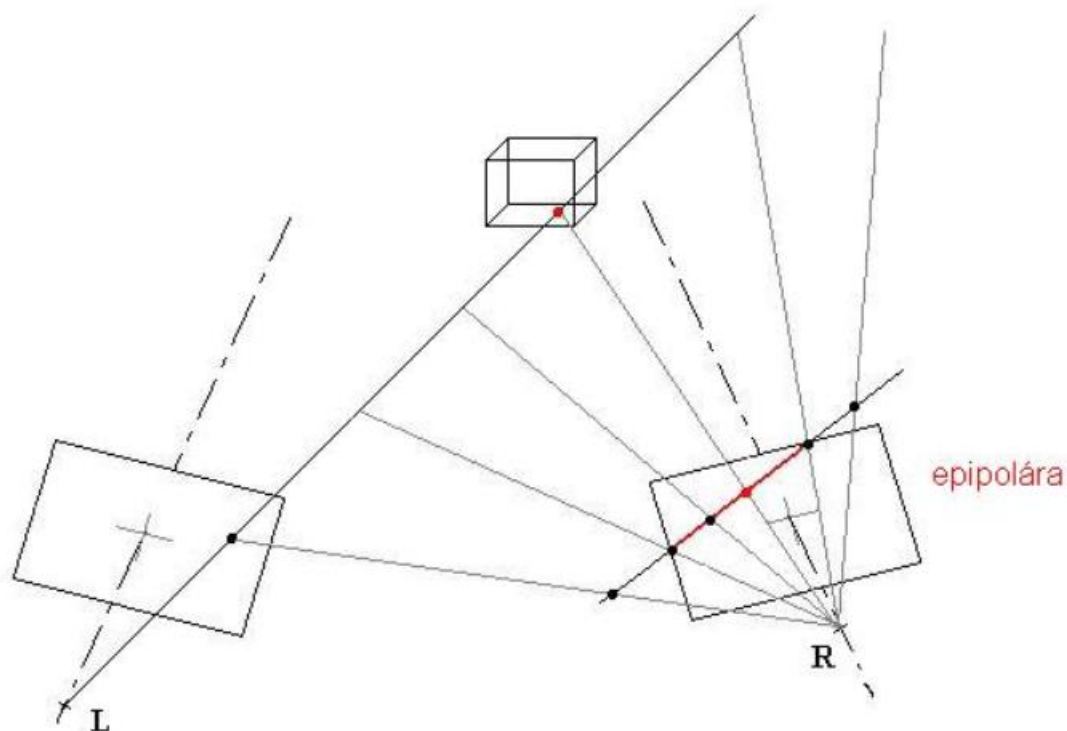
U technik se samokalibrací nemusí být výchozí polohy kamer dopředu známy. Jejich relativní pozice se získává přímo ze snímků načerpaných sledováním dané scény, objektu nebo ze vzájemného sledování polohy kamer v sestavě. Pro tyto účely se zpravidla do scény vkládá kalibrační objekt známých rozměrů, většinou doplněný o kalibrační vzor. Tento objekt se poté nalezne ve snímcích dané scény a podle jeho natočení a změny velikosti měřítko se určí potřebné parametry pro měření. Jednoduchou a často používanou technikou je stereovidění, což je speciální podskupina metod s více kamerami. Je to technika, která se snaží simulovat lidský zrak. Každé oko vytváří středový 2D obraz pozorovaného objektu na sítnici. Pokud se tyto dva pohledy spojí, vznikne prostorový, respektive stereoskopický obraz. Stereovize pak funguje na stejném principu, místo očí se použijí dva snímače (CCD kamery). [16]

Stereoskopické snímky jsou dva perspektivní obrazy. Důležitý je úhel, který svírají oba sdružené paprsky, tzv. úhlová paralaxa (viz. úhel γ na Obr. 5). Bod P je měřený bod a body L a R jsou ohniska kamer. Pro body bližší pozorovateli je paralaxa větší než pro body vzdálenější. Aby se prostorové vidění náležitě uplatnilo, nesmí její velikost klesnout pod určité minimum. [16]



Obr. 16: Princip stereoskopických snímků [16]

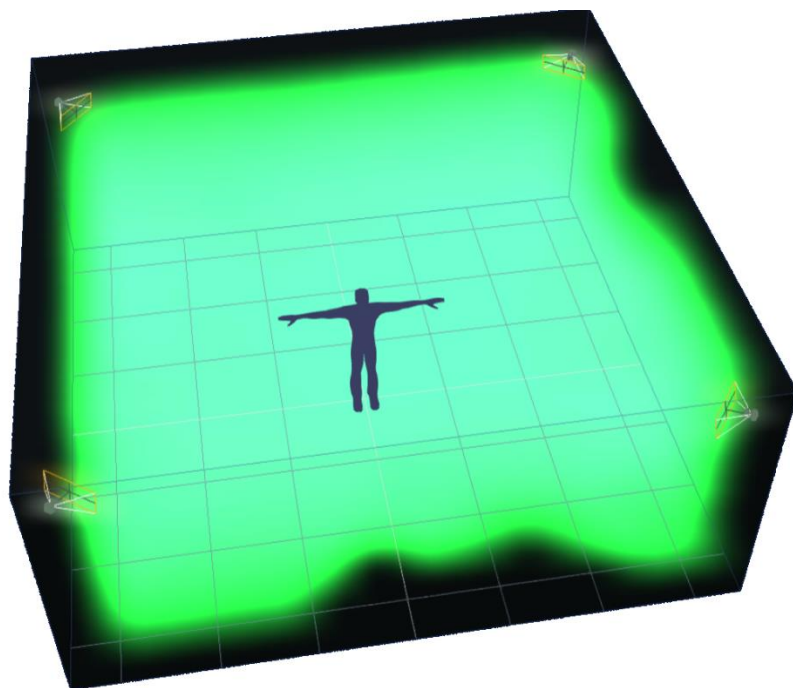
Tento případ však funguje pouze u systémů, kde jsou optické osy kamer rovnoběžné s osou Z souřadnicového systému, ohnisková vzdálenost kamer je stejná a obrazové roviny kamer leží v rovině $z = 0$. Pokud se daný předpoklad nepodaří dodržet, je nutné použít korekčních vztahů. Korespondenční problém automatického nalezení bodu v obrazech levé i pravé kamery je zjednodušen tím, že odpovídající body musí ležet na epipoláře (epipolární linie). Je-li určitý bod nalezen na snímku z jedné kamery, leží stejný bod na druhé kameře na úsečce (viz. Obr. 6), která vznikne jako průmět myšlené spojnice „ohnisko kamery – nalezený bod ve snímku – označený bod na objektu – nekonečno“ do obrazové roviny druhé kamery. Bod po bodu lze pak ze dvou daných sdružených stereoskopických snímků určit celý geometrický prostor. [16]



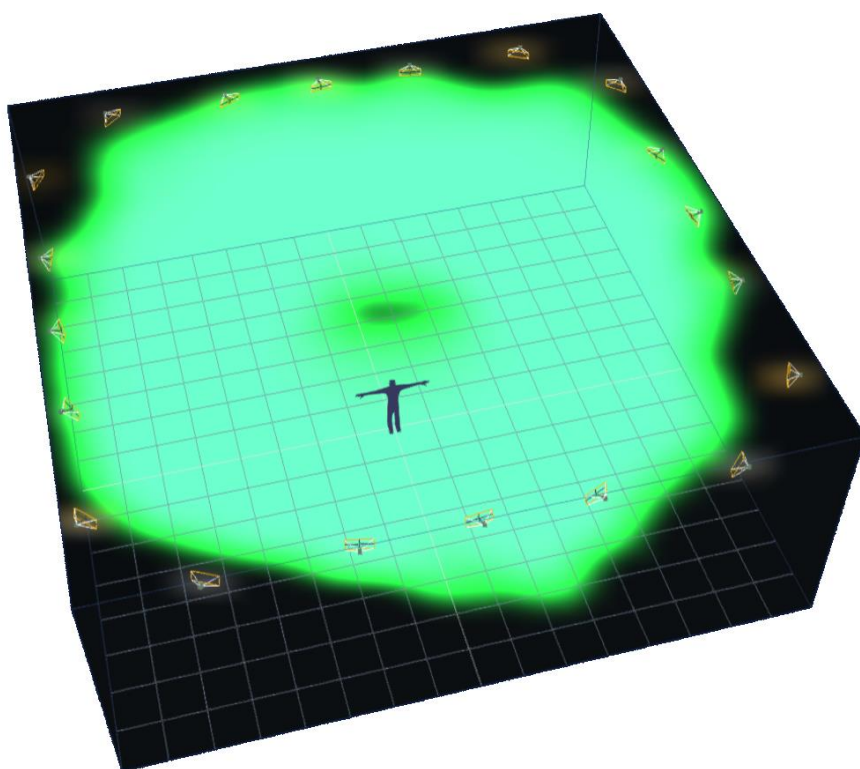
Obr. 17: Stereoskopie – epipolární linie [16]

4.1.2 ROZMÍSTĚNÍ KAMEROVÉHO SYSTÉMU

Pro instalaci kamerového systému VICON je nutné předem znát, kde přesně bude využíván. Je také důležité vědět, jaké objekty budou předmětem snímání. Z toho se odvíjí počet použitých kamer a také kvalita získávaných dat. V místnosti čtvercového tvaru dosahující rozměrů maximálně $8 \times 8 \times 3$ metry jsou i čtyři kamery, v závislosti na jejich kvalitě, schopné pokrýt až 90 % snímaného prostoru. S rostoucí velikostí místnosti roste počet kamer, a to exponenciálně. Znamená to, že při použití stejného typu kamer pro místnost, respektive halu, dvakrát tak velkou ($16 \times 16 \times 3$ m), nelze dosáhnout 90 % snímaného prostoru ani za použití 20 kamer. Proto je vždy nutné zvážit, zda je tato metoda snímání obrazu vhodná pro danou aplikaci. Na obr. 17 a obr. 18 lze tento rozdíl vidět graficky. [17]



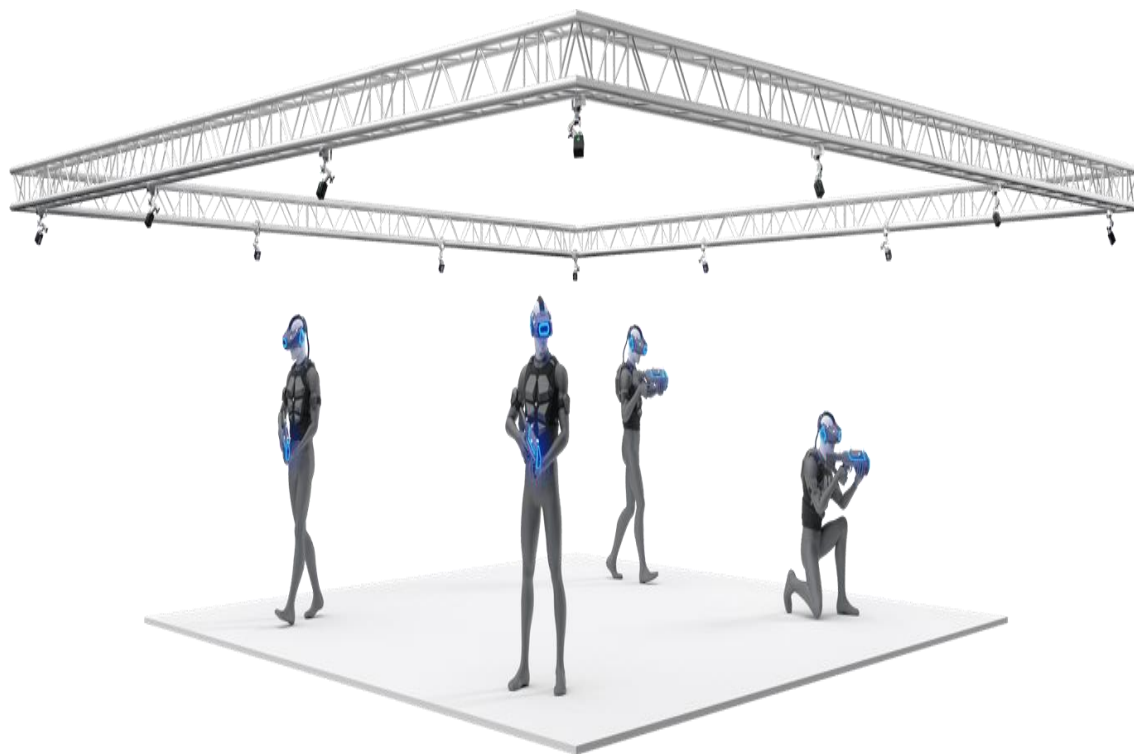
Obr. 18: Rozmístění kamerového systému pro místnost 8×8×3 metrů, počet kamer 4, pokrytí až 90 % snímaného prostoru [17]



Obr. 19: Rozmístění kamerového systému pro místnost 16×16×3 metrů, počet kamer 20, pokrytí až 50 % snímaného prostoru [17]

4.2 SYSTÉM OPTITRACK

OptiTrack je největším poskytovatelem systému pro snímání pohybu na světě. Nabízí vysoce výkonný systém optického sledování za relativně dostupné ceny. Následující podkapitoly podrobně rozeberou princip jeho fungování a využití v různých aplikacích.



Obr. 20: Náhled sestavy systému OptiTrack pro sledování pohybu kostry člověka [28]

4.2.1 ZÁKLADNÍ INFORMACE

Optický systém pro snímání pohybu získává 3D pohybové dat následujícím způsobem. V systému snímání pohybu je kolem cílového prostoru snímání instalováno několik synchronizovaných kamer přičemž každá z nich zaznamenává 2D obrazy. Jsou vypočteny 2D pozice, data překrývající polohy těchto pozic jsou porovnávána a následně je proveden výpočet 3D pozic pomocí triangulace. Princip této triangulace je popsán v kapitole 4.1.1. [29]

Doporučené prostředí pro snímání má jasně daná specifika. Optické systémy pro snímání pohybu získávají data detekováním emitovaného nebo odraženého světla, proto se doporučuje minimalizovat okolní osvětlení, aby se snížilo rušení slunečním světlem, vnějšími zdroji osvětlení nebo jinými světelnými odrazy. [29]

Rozmístění kamerového systému má svá obecná pravidla, avšak může se značně lišit při různých aplikacích. Obecně je výhodné mít kamery uspořádané kolem obvodu snímané scény a v různých výškách tak, aby se dosáhlo pohledu z co nejvíce úhlů. Každý typ kamery má také jiné parametry pro snímání maximální

vzdálenosti. Ty nejvýkonnější modely (Prime 41) jsou schopny snímat sledovací značky, tzv. *mocap markery*, o velikosti 16 milimetrů na objektech, a to až do vzdálenosti 30 metrů. Konkrétní příklady rozmístění kamer jsou porovnány v kapitole 4.2.8. Je však důležité mít na paměti, že sledovatelný rozsah v optickém snímání pohybu závisí na mnoha proměnných. Na velikosti značky, typu značky a nastavení prostředí snímání. Kamery OptiTrack jsou ale vybavené výkonným polem LED a zobrazovacím zařízením s vysokým rozlišením, které umožňuje sledování na velmi velké vzdálenosti. [29]

4.2.2 ZACHYCENÍ POHYBU

Pomocí kamer OptiTrack lze věrně zachytit v podstatě všechny typy pohybu, ať už se jedná o pohyb lidského či zvířecího těla anebo třeba pevných těles, včetně opravdu jemných a rychlých pohybů. Pohyb pevného tělesa (rigid body) lze zachytit, jsou-li viditelné alespoň tři pohybové markery. Pohyb obličeje a těla (soft body) lze zaznamenat tehdy, pokud je viditelný dostatečný počet markerů. Toto číslo se mění v závislosti na snímaném objektu. Pohyby, které vyžadují nadměrnou okluzi markerů, mohou vyžadovat úpravu sady těchto značek a také úpravu rozmístění kamerového systému. Čím více bude pohyb dynamický, tím více bude nutné zvýšit počet kamer a markerů, aby byla zachována kvalita dat generovaných OptiTrackem. [29]



Obr. 21: Typ rigid body markeru X-base Marker - 14 mm [30]

Kamerová sestava je schopná při jedné aplikaci snímat všechny typy pohybů současně a není potřeba mít více okruhů kamer, jako například jeden okruh pro snímání objektu typu rigid body a druhý pro snímání objektu typu soft body. Je ale potřeba mít sestavu nakonfigurovanou pro ten nejsložitější měřený pohyb scény. Co je však omezeno, je počet snímaných objektů. Pokud se vezme jako nejnáročnější pohyb ke snímání pohyb lidského těla, tak je OptiTrack schopný při maximální

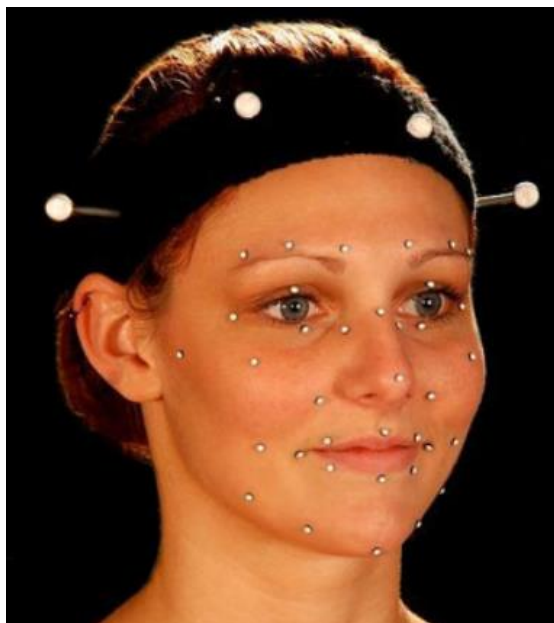
kvalitě snímat až dvanáct osob najednou. V případě snímání pouze tuhých těles se počet může přiblížit až třiceti objektům. Počet osob nebo objektů, které lze sledovat pomocí optického systému pro snímání pohybu, je založen na množství ovlivňujících faktorů, jako je snímané prostředí, v němž se objekty pohybují nebo specifikace nastavení systému. V závislosti na tom, jak jsou tyto faktory optimalizovány, se počet sledovaných aktivit může výrazně lišit. Z toho důvodu nelze vždy přesně určit, jaká kamerová sestava bude pro danou aplikaci dostačující. Pro komplexní pohyby typu běh člověka existují metody, jenž při správném rozmístění markerů dokážou matematickým výpočtem pomoci k předvídání pohybu, a tak i k dokonalejšímu datovému záznamu. [29]



Obr. 22: Příklad rozmístění markerů pro aplikaci běh člověka [31]

Snímání obrazu není výlučně spjato s vnitřním prostředím. OptiTrack lze také užívat v prostředí venkovním. Kamery řady Prime jsou vybaveny výkonným LED bleskem a jsou tedy vhodné pro detekci pasivních (reflexních) markerů při silném slunečním světle. Pro další zlepšení viditelnosti pohybových značek a rozsahu sledování lze místo pasivních značek použít aktivní LED značky. [29]

OptiTrack dokáže snímat i tak komplexní pohyby jako je pohyb ruky a jednotlivých prstů. Pro tyto pohyby existují standardní sady markerů, které vytvářejí kosterní model zaměřující se na pohyb prstů i celého těla. Zde je poté sledování prstu provedeno analýzou kinematiky ruky a odhadem pozice každého prstu. Pro přesný výkon sledování prstů mohou být značky připojeny přímo k prstům pomocí kožních lepidel. Je také podporováno snímání tzv. *performance capture*, čili snímání těla i obličeje zároveň. Kamery OptiTrack umožňují uživatelům zachytit jemné detaily z výrazů obličeje a současně sledovat pohyb těla. Se správným 3D rozmístěním markerů se dá dosáhnout sledované přesnosti až jeden milimetr. [29]



Obr. 23: Ukázka rozmístění markerů pro detailní snímání obličeje [32]

Lze také zachytit rychlé pohyby jako je pohyb auta nebo švih golfové hole. Kamery pro snímání pohybu jsou schopné dosáhnout snímkovací frekvence až 360Hz, což umožňuje zachycení „rozmazaného“ pohybu pro většinu objektů. Naprosto běžné je snímání různých kyvadel, pístů, pohybů lidí nebo dronů, a to až do rychlosti pohybu 200 km/h. [29]

Důležitá vlastnost OptiTracku je, že dokáže generovaná data snímaného pohybu synchronizovat s externími zdroji. Po připojení k systému OptiHub nebo systému eSync mohou kamery synchronizovat časování na tyto zdroje. Běžně se to využívá například k ovládání hardwarových prvků jako jsou silové desky, závory, časové generátory nebo displejem vybavené headsety. Pro většinu aplikací jsou 3D data zpracovávána v reálném čase při plné obnovovací frekvenci systému. Aplikace náročné na množství generovaných dat se systém snaží zpracovávat co nejrychleji a v reálném čase. To vede k výsledku, že konečná „živá data“ nejsou dostupná pro každý snímek, ale jen pro jejich většinu v závislosti na složitosti snímané scény.

Pokud vyhodnocování dat není podmíněno časem, jsou data zpracována a vyhodnocena bez výjimek všechna. [29]

4.2.3 MOŽNOSTI KAMEROVÉHO NASTAVENÍ

Kamery OptiTrack jsou schopné pracovat v několika barevných režimech. Nejdůležitější a nejpoužívanější je záznam scény ve všech stupních šedi (greyscale video). Vývojářské prostředí Motive SDK nebo Camera SDK poskytuje množství výběru různých režimů videa a následný přístup k datům. Podporuje také video MJPEG ve všech stupních šedi pro přenos snímků s upraveným vzorkováním, aby se dosáhlo snížení síťového provozu. Video režimy šedé škály a MJPEG jsou velice užitečné pro záznam referenčních videí a pro úpravu zaostření či zaměřování kamery.

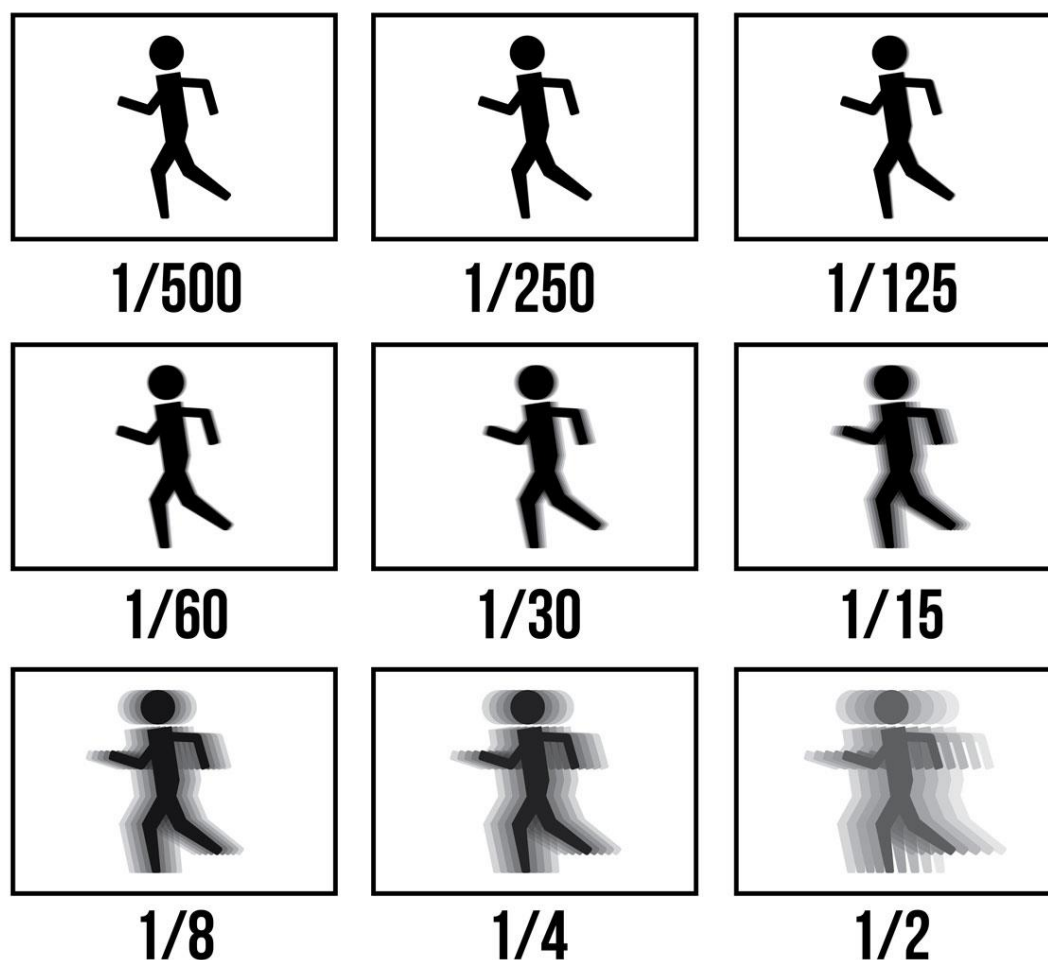


Obr. 24: Kamera OptiTrack Prime^x 41 [28]

Nastavení jasu IR LED prstence kamery může zásadně ovlivnit výsledný obraz. Vyšší hodnoty LED umožňují kamerám vyzařovat více IR (infračerveného) světla, což zvyšuje použitelný rozsah kamer a markerů. Příliš vysoká hodnota však může vytvářet odrazy od neoznačených objektů, které pak mohou znehodnotit jinak kvalitní data. Obecně se doporučuje používat nastavení osvětlení na maximum, s výjimkou snímání z velké blízkosti. [29]

Je také důležité věnovat pozornost nastavení expozice a jejího vlivu na výsledná data. Expozice v nastavení kamery představuje hodnotu jak dlouho zůstane závěrka kamery otevřená pro každý snímek. Čím větší hodnota expozice, tím více světla je vpuštěno do objektivu a to následně vytváří jasnější obraz. Výhodou je, že jasnější snímky dokážou zvýšit detekci velmi malých markerů. Nastavení příliš vysoké expozice ovšem může způsobit sloučení sousedních markerů anebo jejich rozmazání, což může následně negativně ovlivnit kvalitu

sledování. S nastavením expozice souvisí nastavení takzvaného *thresholdu*. Toto nastavení určuje minimální jas pixelu, který má být zohledněn při výpočtu 2D objektu. Všechny pixely s jasnem pod nastaveným prahem jsou ignorovány a nebudou zobrazeny na výsledném snímku. Zvýšení prahové hodnoty *thresholdu* může pomoci s filtrováním světelné interference od nechtěných markerů v pohledu kamery. Naopak snížení tohoto prahu může umožnit kameře snímat méně viditelné, opotřebované nebo hodně vzdálené markery. [29]



Obr. 25: Snímání člověka a důsledky nastavení délky expozice od rozsahu 1/500 (0.002 s) po 1/2 (0,5 s) [33]

Dalším nastavitelným parametrem je snímkovací frekvence FPS (Frame Per Second). Hodnota FPS určuje počet snímků, které kamera zachytí za jednu sekundu. Vyšší nastavené hodnoty umožní zaznamenávat více snímků v daném čase a tím i zvýší celkovou výstupní kvalitu dat. Naopak nižší hodnoty FPS umožní nastavit vyšší hodnoty expozice pro jasnější snímky a sníží při přenosu dat zátěž sítě. [29]

4.2.4 SOFTWARE MOTIVE

Při práci s kamerovým systémem lze využít několik typů softwaru. OptiTrack využívá systém MOTIVE ke sběru a zpracování dat snímaného pohybu. Základní licencované softwary jsou MOTIVE:Tracker, MOTIVE:Body a MOTIVE>Edit. Pro zachycení pouze těles typu rigid body slouží software MOTIVE:Tracker. Pokud aplikace vyžaduje komplexnější sledování scény, kde je vyžadováno sledování kostry a také se zde nachází tělesa rigid body, je nutné využít software MOTIVE:Body. K editaci a přehrávání dat se pak využívá poslední zmíněný software MOTIVE>Edit. [29]



Obr. 26: Náhled do prostředí MOTIVE:Body [34]

MOTIVE:Body podporuje také výpočet dat pohybové kostry (soft body). Zahrnuje i schopnost streamování těchto dat do jiného softwaru v reálném čase s využitím různých streamovacích protokolů. Systém je schopen rozpoznávat více těchto skeletů. Princip je takový, že se nasnímá každá jedna kostra, či jiný objekt zvlášť a zaznamenají se jejich unikátní markery a prostorové vztahy mezi nimi. Pokud mají dva snímané objekty identický tvar, je vhodné u jednoho z nich některou z těchto snímaných pohybových značek odsadit, aby je systém dokázal správně odlišit. Například u modelu člověka se doporučuje odsadit marker umístěný v pase. Software disponuje vlastním souborem šablon pro umístění markerů na sledované objekty, ty lze však upravit dle vlastních požadavků. [29]

4.2.5 DATOVÉ FORMÁTY

MOTIVE:Tracker podporuje export dat ve formátu CSV a C3D. MOTIVE:Body také umožňuje export dat ve formátu CSV a C3D, rovněž ale také FBX (binární a ASCII),

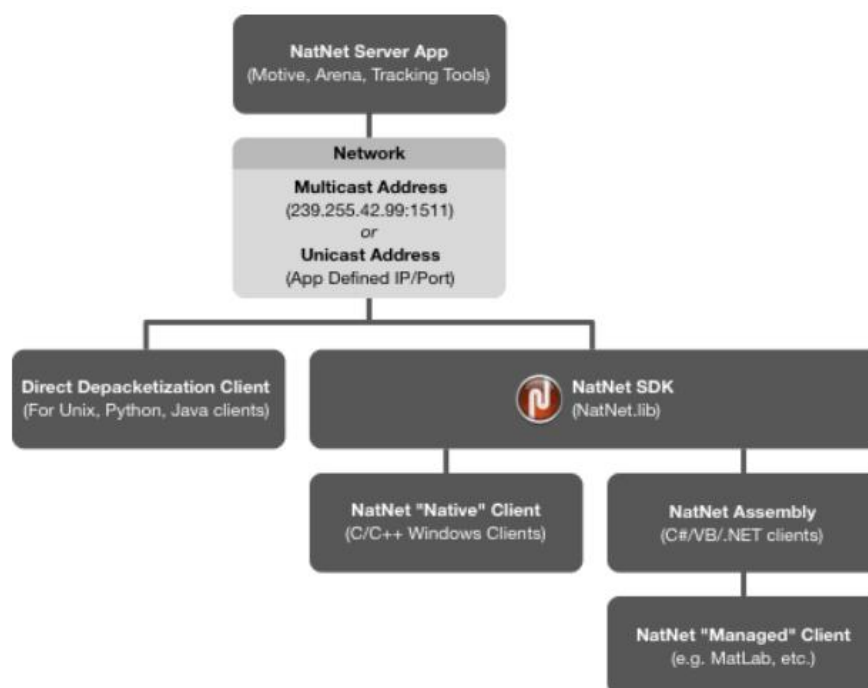
BVH a TRC. Kromě toho mohou být zachycená data dále streamována do jiného softwaru využívajícího podporující pluginy. [29]

MOTIVE podporuje operační systémy Microsoft od řady Windows Vista, ideální je však užití novějších řad, třeba Windows 10. Ostatní operační systémy typu Linux nebo OSX zatím podporovány nejsou. [29]

Camera SDK poskytuje přístup k nejdůležitějším datům, jako jsou snímky v šedé škále a informace o 2D objektech z každé kamery. Dostupné údaje zahrnují také subpixelovou polohu středu (X, Y) a oblast markeru na zobrazeném objektu v pixelech. Dále je prováděna rekonstrukce 3D obrazu pomocí 2D snímků a výsledná data nesou informaci o souřadnicích ve formátu X, Y, Z. [29]

4.2.6 STREAMOVÁNÍ DAT

Pro streamování dat se využívá prostředí NatNet SDK. Jeho architektura klient/server umožňuje klientským aplikacím fungovat na stejném systému jako sledovací software MOTIVE, na jiném systému nebo i na obou systémech zároveň. Sada NatNet SDK se snadno integruje se standardními nástroji API (C/ C++/ .NET/ Microsoft Visual Studio) a protokoly (UDP/ Unicast / Multicast). Pomocí této sady mohou vývojáři rychle integrovat data sledování pohybu do nových i stávajících aplikací, včetně vlastních doplňků pro aplikace třetích stran a enginů pro streamování. NatNet také podporuje streamování v reálném čase přes internet. Preferované konfigurace jsou přímé ethernetové připojení nebo privátní LAN/hub pro aplikaci typu klient/server. [35]



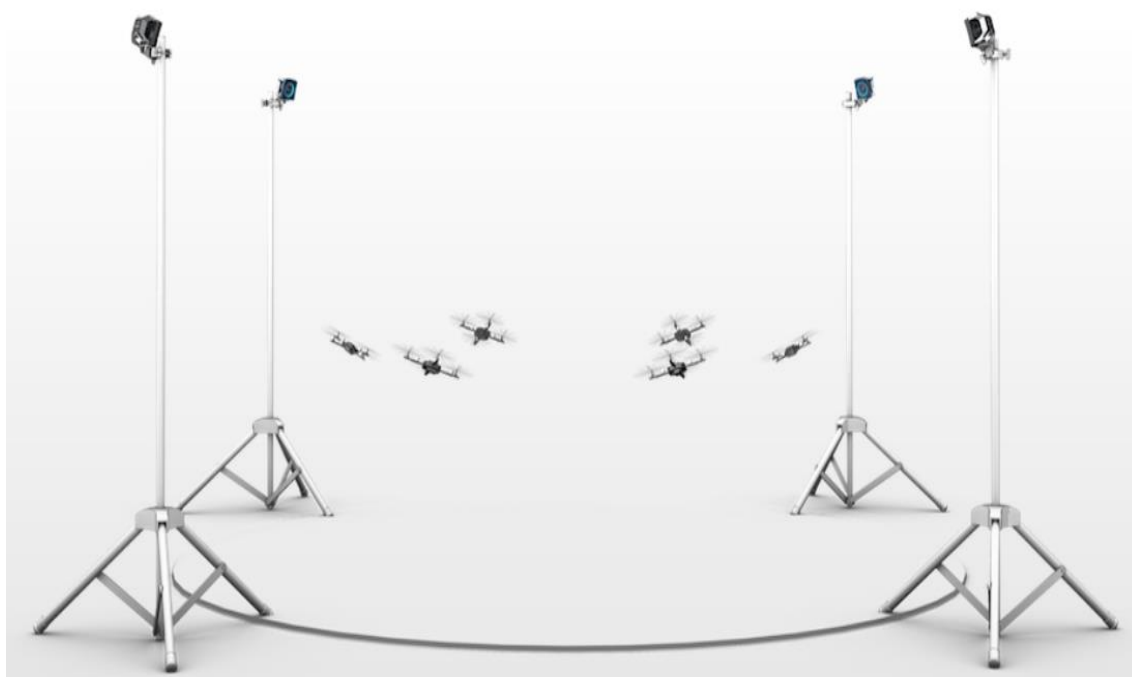
Obr. 27: Síťová sada NatNet SDK typu klient/server pro streamování dat sledování pohybu napříč sítěmi. [35]

4.2.7 PODPORA VÝVOJOVÝCH PROSTŘEDÍ

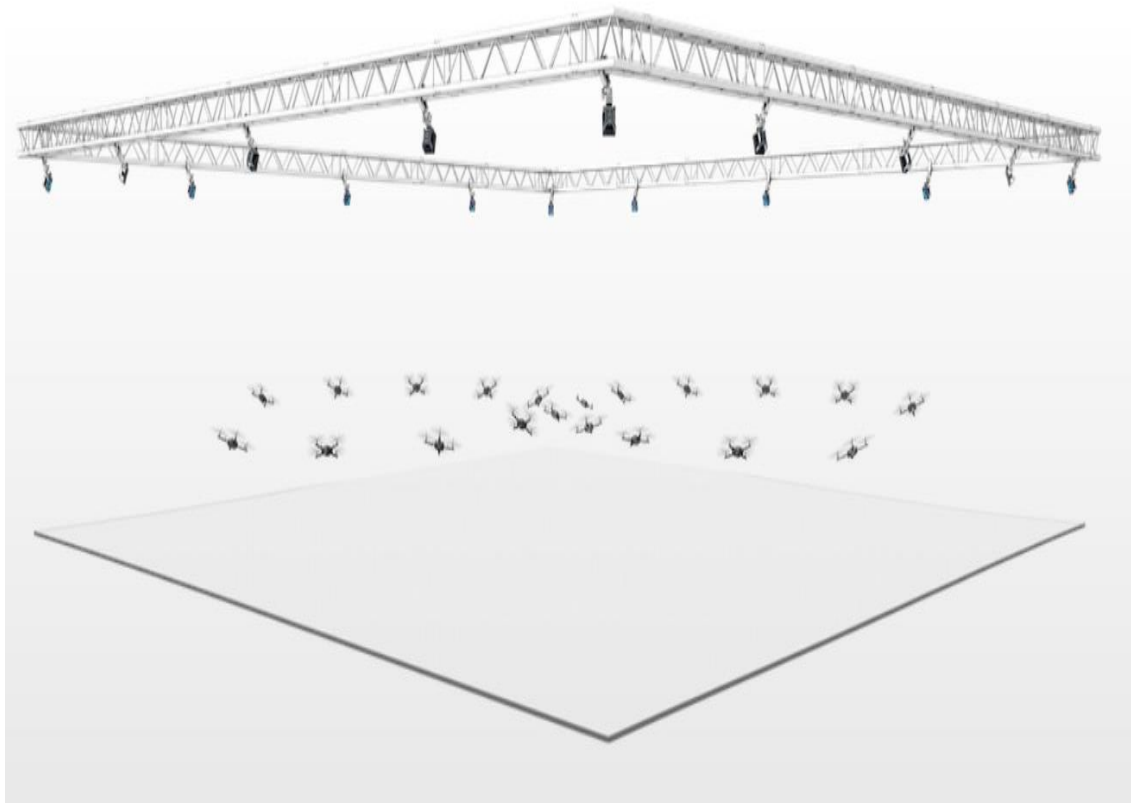
Systém OptiTrack disponuje celou řadou volně dostupných pluginů. V první řadě je to plugin pro headset HTC VIVE s přímou podporou od společnosti Valve nebo pro vývojová prostředí Unreal Engine 4 a UNITY 3D. Jsou také dostupné pluginy pro grafická studia (např. Maya, MotionBuilder) a streamovací služby (VRPN Real-time Streaming). [29]

4.2.8 ROZMÍSTĚNÍ KAMEROVÉHO SYSTÉMU

Každá aplikace má své speciální požadavky na rozmístění kamerového systému. Nejprve je důležité zvolit pro jakou aplikaci je systém navržen, zdali se jedná o virtuální realitu, pohyb lidí, robotiku nebo animaci. Podle prostředí snímané scény a základu požadované kvality snímků se poté vybere typ kamery. Poslední hlavní požadavek je velikost scény. Následující dva obrázky jsou návrhy kamerového systému podle stejného počtu podobného typu kamery vybrané v kapitole 4.1.2, kde byl prováděn návrh kamerového systému VICON. [29]



Obr. 28: 4 OptiTrack kamery, snímaný prostor max. 5x5x2 m [36]



Obr. 29: 20 OptiTrack kamer, snímání prostor max 12x12x5 m [36]

5 VOLBA FRAMEWORKU

Pro tvorbu samotného programu bylo potřeba vybrat framework pro zobrazování 3D objektů do průhledových brýlí, potažmo celé scény do brýlí virtuální reality. V první řadě bylo nutné vybrat vhodný operační systém. Zde bylo vybíráno mezi MS Windows 10 a otevřenou linuxovou distribucí Ubuntu. Dalším krokem bylo zvolení vhodného enginu pro napsání programu vytvoření umělé scény. V prostředí MS Windows se jednalo o herní engine Unity 3D, dále Unreal Engine 4 a jako poslední CryEngine 5. V Ubuntu byla jediná vhodná varianta frameworku – ROS. Poslední důležité rozhodnutí se týkalo výběru programovacího jazyka. Všechny zmíněné engine podporují více programovacích jazyků, avšak každý z nich má ve svém výběru jeden programovací jazyk, který uživatelsky podporuje zdaleka nejvíce. Pro Unity 3D je to C#, pro Unreal Engine 4 a CryEngine 5 je C++, a ve frameworku ROS je nejvyužívanějším programovacím jazykem PYTHON.

5.1 VÝBĚR OPERAČNÍHO SYSTÉMU

Volba operačního systému v této aplikaci nemá zásadní vliv na funkčnost vyvíjeného programu pro průhledové brýle, ale je důležitá z důvodu výběru vývojového prostředí, enginu, který bude následně použit pro programování uživatelské aplikace.

5.1.1 MS WINDOWS 10

Windows 10 je operační systém od firmy Microsoft z řady Windows NT, který byl vydán 29. července 2015. Tento operační systém zavádí jednotné uživatelské prostředí pro různé platformy. Jedná se především o osobní stolní počítače a notebooky, systém ale podporuje také tablety, chytré telefony, herní konzole Xbox a další. Windows 10 je standardně dostupný ve velkém množství edicí, avšak pro účely této práce postačí základní edice Home. Minimální hardwarové požadavky pro správné fungování tohoto operačního systému zobrazuje obrázek č. 19. MS Windows se jeví jako ideální operační systém, protože podporuje širokou škálu programů a aplikací vhodných pro vytváření virtuální scény. [37]

Procesor:	1 gigahertz (GHz) nebo rychlejší procesor nebo systém na čipu (SoC)
RAM:	1 GB pro 32bitovou verzi a 2 GB pro 64bitovou verzi;
Volné místo na pevném disku:	16 GB pro 32bitovou verzi operačního systému, 32 GB pro 64bitovou verzi operačního systému
Grafická karta:	DirectX 9 nebo novější s ovladačem WDDM 1.0
Obrazovka:	800x600

Obr. 30: Minimální požadavky Windows 10 [38]

5.1.2 UBUNTU

Ubuntu je komunitou vyvíjený operační systém, jenž zastřešuje britská společnost Canonical. Zakládá se na Linuxovém jádře a je od základu navrženo s ohledem na bezpečnost. Díky tomu se minimalizuje riziko zavirování či jiné narušení běhu počítače. V Ubuntu se nachází kompletní pracovní prostředí s balíkem základních programů, které mohou být rozšířeny o tisíce dalších. Je to robustní operační systém s významným využitím v robotice, a to především díky frameworku ROS.

Minimální hardwarové požadavky pro užití operačního systému Ubuntu jsou zobrazeny na obrázku č. 20 [39]

- 64-bit processor for iso, Intel Pentium 4 processor or better for installation using the Ubuntu minimal CD. The Ubuntu minimal CD supports installation of Ubuntu on computers that have a 32-bit processor.
- 1GB RAM
- Graphics processor and display capable of at least 1024x768
- 10 GB of disk space

Obr. 31: Minimální požadavky Ubuntu pro nejnovější verze 17.10 až 20.04 [40]

5.2 VÝBĚR VÝVOJOVÉHO PROSTŘEDÍ

Výběr správného vývojového prostředí je velice důležitý pro funkčnost celé aplikace i pro pohodlí vývojáře. Každý engine má svůj vlastní přístup k vývoji virtuální a rozšířené reality. Tyto rozdíly začínají u podpory konkrétních programovacích jazyků, dále u přístupu modelování umělé scény až po *assets*. Pojem *asset* představuje jakékoliv prvky či objekty jako jsou textury, modely, materiály, ale také skripty či zvuky. Tyto *assets* jsou buď přímou součástí engineu nebo se dají stáhnout. Některé bývají k dispozici zdarma, a to zejména *assets* z oficiální distribuce přímo

od výrobce enginu. Některé je potřeba zakoupit, ty bývají zpravidla vytvořeny komunitou.

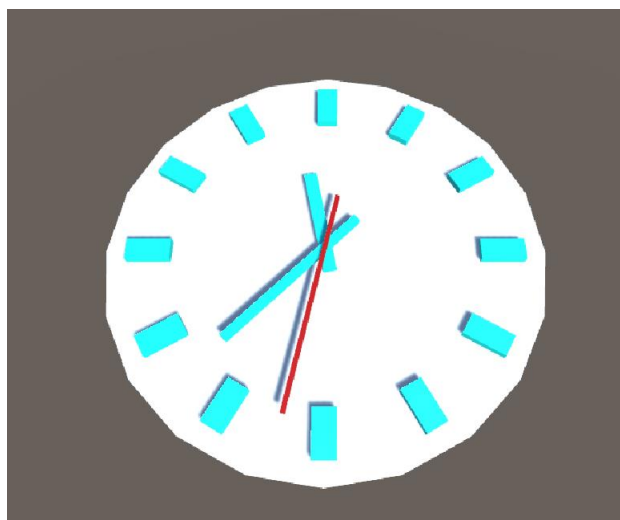
5.2.1 UNITY 3D

Pátá verze tohoto velmi oblíbeného enginu vyšla v březnu 2015. Unity je vývojové prostředí, které je ideální především pro vývojáře her, a to zejména pro mobilní zařízení. Je to dáno hlavně značně jednoduchou *portovatelností* na mobilní formáty Android a iOS. Avšak vývoj na jiná zařízení, PC, PS4, Xbox One nebo další starší konzolové systémy není vůbec ojedinělý a Unity ho bez problémů zvládá. [a5]

Jedno z mála negativ, které Unity obsahuje, je omezená manipulovatelnost při práci s *assety*. Engine sice disponuje jakýmsi základním modelovacím prostředím, kde lze vytvářet základní geometrické modely, avšak vývojáři Unity se především spoléhají, že programátor si *assety* zajistí z jiných zdrojů. Tyto zdroje představují různé programy na tvorbu 3D modelů, například Blender, 3DS Max či Maya. Obrázek č. 32 zobrazuje možnosti výběru všech 3D objektů nabízených v Unity. Těmto prvkům se po vytvoření dají následně upravit pouze rozměry. Příkladem velice omezené možnosti 3D tvorby je obrázek č. 33 s vymodelovanými hodinami pomocí základních geometrických prvků koule a kvádr. [41]

3D Object	>	Cube
2D Object	>	Sphere
Effects	>	Capsule
Light	>	Cylinder
Audio	>	Plane
Video	>	Quad

Obr. 32: Výběr 3D objektů v Unity 3D

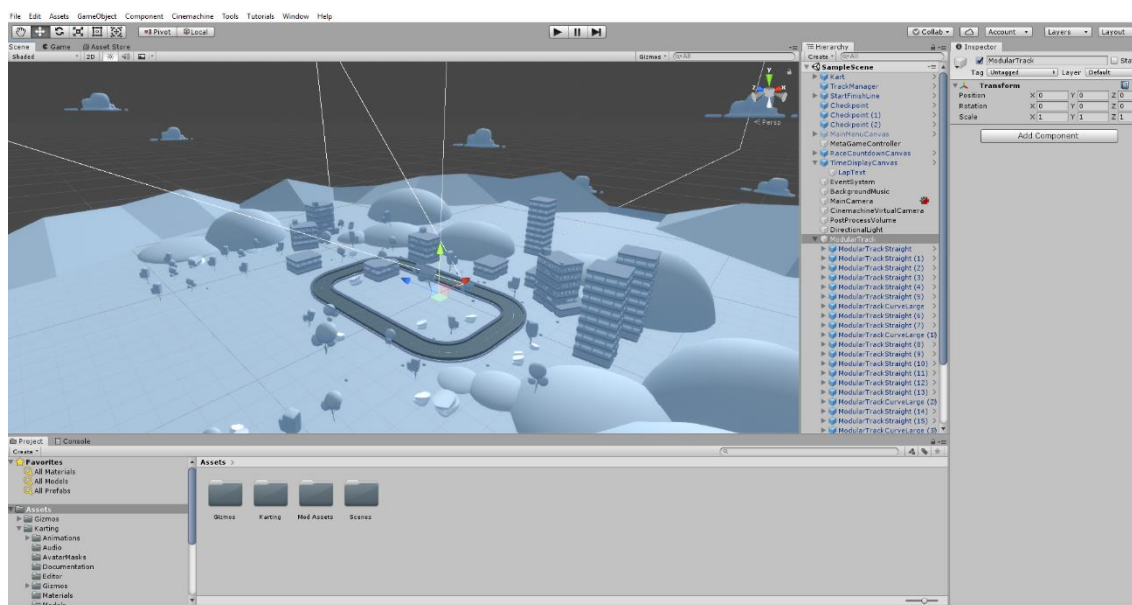


Obr. 33: Model hodin vytvořených pomocí modelovacích nástrojů Unity 3D

Pokud vývojář nemá své vlastní *assets*, má možnost jednoduše navštívit *Unity Asset Store*, kde jsou k dispozici zdarma, nebo je za menší poplatek stáhne a jakkoliv využije. V této diplomové práci byla tato možnost zásadní, protože Unity jako jediné vývojové prostředí nabízí zdarma ke stažení plugin pro komunikaci a ovládání průhledových brýlí Moverio.

Interaktivity a animace vytvořených 3D modelů je v Unity možné dosáhnout několika způsoby, ať už se samostatně využijí vestavěné funkce stavových automatů nebo animačních komponentů, nejdůležitější a nejrozšířenější je využívání takzvaných scriptů. Unity, v závislosti na verzi, podporuje hned několik programovacích jazyků. Nejstarší verze využívaly převážně jazyk Boo, který ale v roce 2014 přestal být podporovaný kvůli malé uživatelské základně. Dalším hojně využívaným jazykem je JavaScript. Ten je však také na ústupu a od verze z roku 2018 už jej není možné využívat. Podpora pro starší verze je ale stále aktivní. Nejnovější verze Unity využívají jazyk C#. Oproti dvěma předchozím jazykům je univerzálnější a jednodušeji aplikovatelný na více platform. Uživatelská základna je také větší, což byl další důvod nasazení podpory toho jazyka. Od verze z roku 2018 je to hlavní a jediný podporovaný programovací jazyk v Unity. [41]

Unity je dnes k dostání v několika verzích. Zdarma lze stáhnout variantu Student nebo Personal. Obě jsou určeny převážně pro vlastní potřebu a vývoj. Hlavní podmínkou užívání je, že osoby či firmy užívající tyto verze nevydělaly za posledních 12 měsíců více než 100 000 dolarů. Dalšími verzemi jsou Plus a Pro za 40, respektive za 150 dolarů za měsíc. Omezeny jsou výdělkem 200 000 dolarů. Poslední verze Enterprise je určena velkým vývojovým společnostem a cena je individuální. [42]

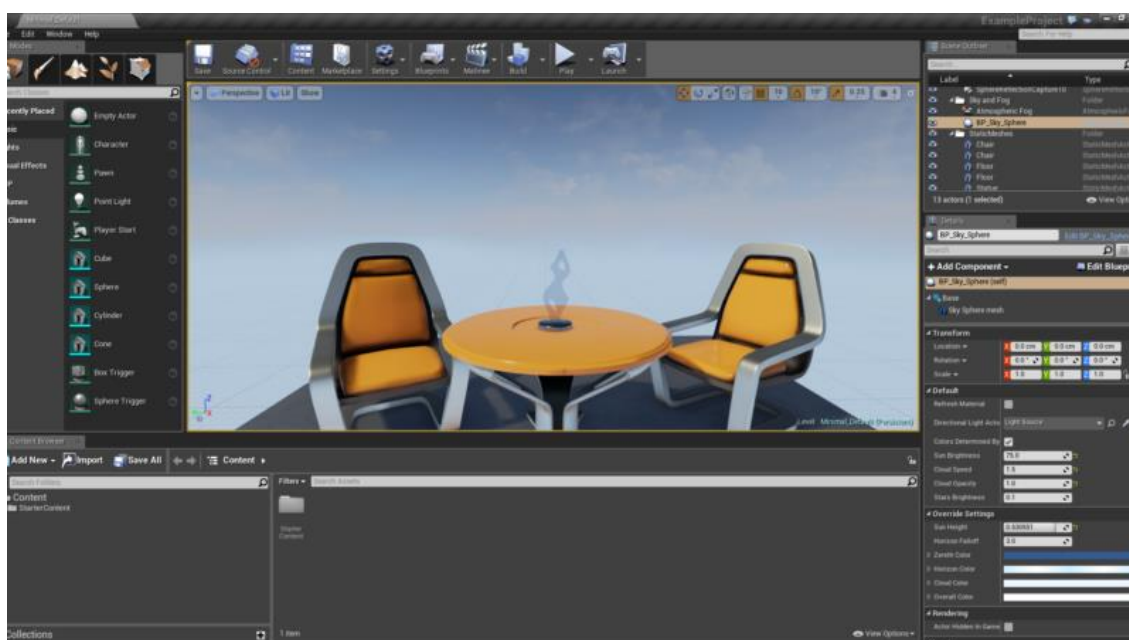


Obr. 34: Náhled na vývojové prostředí Unity 3D, hra Kart z oficiální distribuce stažené z Asset Store

5.2.2 UNREAL ENGINE 4

Je to nejstarší dnes používaný vývojový engine. První vydání Unreal Engine proběhlo už v roce 1998. Toto brzké zveřejnění a mimořádná kvalita zapříčinila, že je to jeden z nejrozšířenější herních engineů současnosti. Unreal Engine je oblíbený zejména díky intuitivnímu ovládání. Pro programátory je však ale důležitější fakt, že v dřívějších verzích používaný jazyk UnrealScript, byl nahrazen klasickým, hojně používaným jazykem C++. S příchodem Unreal Engine 4 přišla i řada grafických vymožeností, díky nimž se dá dosáhnout velmi kvalitního grafického zpracování. Vysoký grafický standard má však za následek, že pro vývoj na starší platformy, například PlayStation3 nebo Xbox 360, je potřeba využít starší verzi tohoto engineu. Dalším důvodem oblíbenosti je také fakt, že engine je již dnes k dispozici zcela zdarma. Pokud ale vývojář hodlá použít Unreal Engine ke komerčním účelům, musí odvádět 5 % veškerých příjmů z aplikací, které byly uvedeny na trh. [41]

Ačkoliv byl Unreal Engine původně vyvíjen za účelem vytváření FPS (Frame Per Second) her, je úspěšně využíván i v jiných herních žánrech. Poslední verze také podporují vývoj aplikací pro virtuální a rozšířenou realitu. Zajímavostí je zápis engineu v Guinessově knize rekordů jako „nejúspěšnější herní engine“. [41]

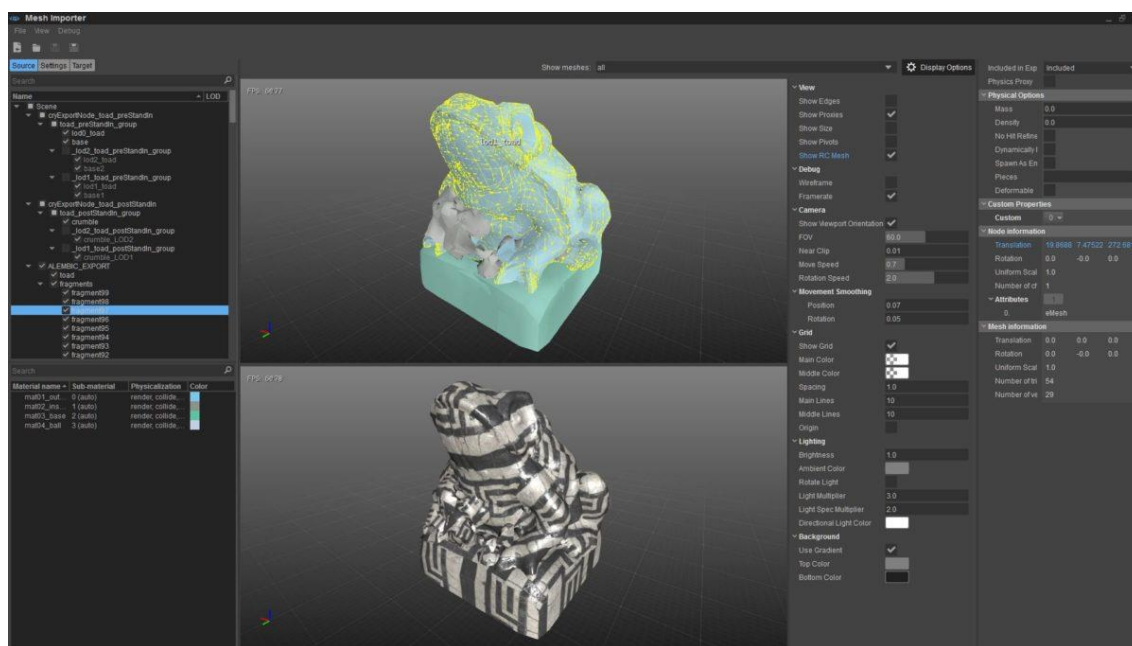


Obr. 35: Náhled na vývojové prostředí Unreal Engine 4[43]

5.2.3 CRYENGINE 5

Vývojové prostředí CryEngine pochází od německého vývojářského studia Crytek. Jeho první verze byla vydána v květnu roku 2002. Konkurenční prostředí, zejména cenová válka s Unreal Engine, donutila vývojáře postupně snižovat paušální poplatky za využívání engineu až do bodu, kdy se studio rozhodlo CryEngine

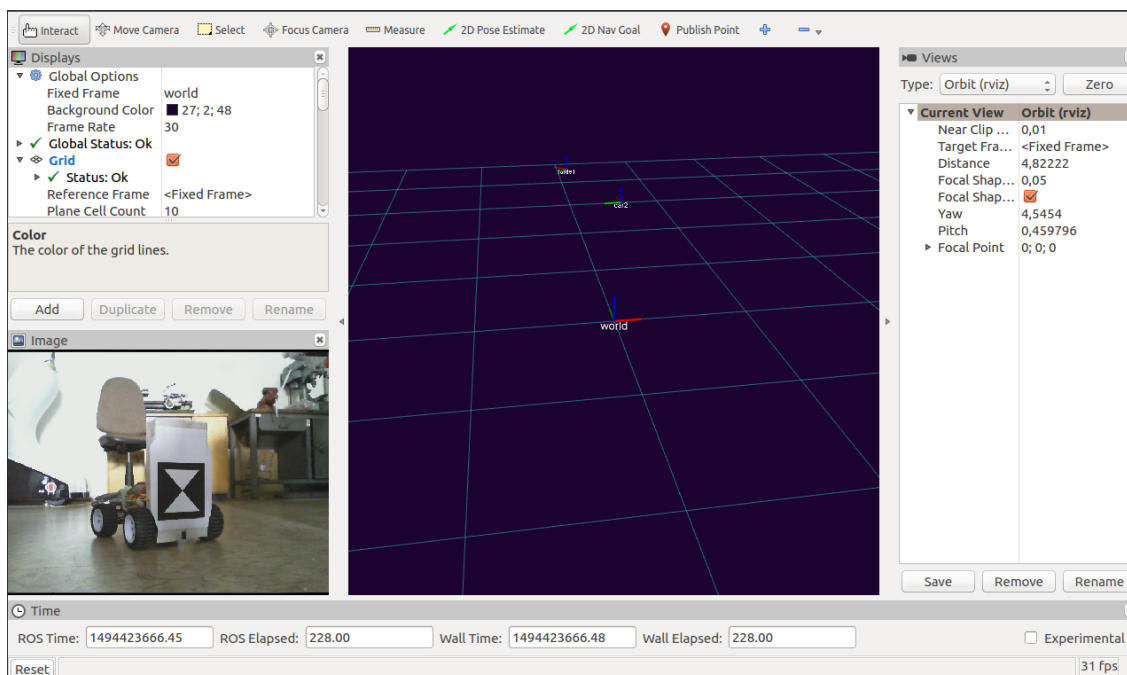
zpřístupnit zdarma. Avšak pouze pro soukromé účely. Pro komerční využití je nutné kontaktovat studio Crytek. Z technického hlediska je to pravděpodobně nejvyspělejší a nej kvalitnější vývojové prostředí vůbec. To však ale neznamená, že je ideální pro všechny vývojáře. Jednotlivci a malá vývojová studia nejsou schopny naplno využít potenciál tohoto enginu. Je určen primárně velkým studiím pro vývoj AAA titulů, což jsou tituly s rozpočty řádově v milionech dolarů. Cry Engine ztrácí po uživatelské stránce zejména v intuitivnosti. Pokud není cílem vytvořit aplikaci s ohromující grafikou, je toto vývojové prostředí až zbytečně komplexní. CryEngine podporuje primárně programování v C++, pro scriptování lze však využít i jazyk Lua. [41]



Obr. 36: Náhled na vývojové prostředí CryEngine 5 [44]

5.2.4 ROS

ROS je zkratka pro robotický operační systém. Nejedná se o vývojové prostředí, jako výše zmíněné enginy, ale o framework sloužící pro psaní robotického softwaru. Je to sbírka nástrojů, knihoven a konvencí, které mají za cíl zjednodušit vytváření komplexního a robustního chování robotické aplikace skrze širokou škálu robotických platform. Součástí ROSu je také vizualizační nástroj RViz, který slouží k zobrazení grafického výstupu. Z pohledu aplikace pro brýle rozšířené reality se ROS, potažmo RViz, jeví jako ideální volba, zejména díky zdarma dostupné široké škále využitelných knihoven pro komunikaci s kamerovým systémem. Avšak grafická stránka a možnosti zobrazení jsou opravdu velmi omezené, téměř až nedostačující. Uvažovat o využití ROSu jako samostatného vývojového prostředí pro virtuální realitu tedy nelze. Na obrázku č. 26. lze vidět, že v porovnání s předchozími enginy je RViz dramaticky zjednodušený. [39]



Obr. 37: Náhled na vývojové prostředí RViz v rámci frameworku ROS [39]

5.3 VOLBA PROGRAMOVACÍHO JAZYKA

Kapitola volba programovacího jazyka jednotlivě dopodrobna rozebere všechny programovací jazyky, které mají plnou podporu vývojových prostředí uvedených v kapitole 5.2. Postupně tak budou analyzovány jazyky C#, C++, JavaScript a Python.

5.3.1 C# .NET

C# je moderní programovací jazyk, vycházející z C++ a Javy. V kombinaci se zavedeným prostředím .NET se snaží zjednodušit a zefektivnit programování. Je úzce spojen s firmou Microsoft a jejími produkty, nicméně díky vzniku open source projektu Mono již není na platformu Windows přímo vázán. Podobně jako Java své kódy kompilujede mezistupně, který teprve vykoná běhové prostředí na konkrétním systému. To má za následek zvýšení přenositelnosti, avšak také to vede k režii, která snižuje význam použití tohoto jazyka pro výpočetně náročné aplikace (např. hry). Pro aplikace, kde se neočekává odezva v řádech jednotek milisekund (naprostá většina aplikací), je však použití C# naprosto dostačující. Pro vývoj aplikace v rámci této práce je to vhodný jazyk. [45]

Autor, rok vzniku:	Microsoft, 2000
Paradigma:	Objektový
Překládáný/interpretovaný	JIT (Just In Time) kompilovaný
Syntaktická rodina	odvozená z C++ a Javy

Platforma	systémy firmy Microsoft s podporou .NET; systémy s podporou projektu Mono (Linux, MacOS, BSD, Solaris, . . .)
Licence:	MS .NET je proprietární, projekt Mono open source implementace
Efektivita:	vhodný pro webové projekty, aplikační software v MS Windows, JIT kompilace může negativně ovlivnit výkon aplikací
Datové typy:	běžné datové typy odvozené z .NET, včetně boolean, typ char jsou Unicode znaky, String, datové proudy
Programové konstrukce:	běžné cykly a podmínky, objekty, jednoduchá dědičnost, rozhraní, konstruktory, garbage collector, virtuální metody, přetěžování funkcí a některých operátorů, výjimky, generika (obdoba C++ šablon)
Výukové materiály:	množství učebnic a článků na internetu, materiály přímo na stránkách Microsoftu(MSDN)
IDE:	MS Visual Studio, SharpDevelop
Rozšiřitelnost:	knihovny .NET
GUI:	Windows Forms
Použití v praxi:	velmi rozšířený jazyk pro webové aplikace, případně okenní aplikace v MS Windows a služby MS Windows
Open-Source projekty:	dostupné, ne moc rozšířené
Zpracování chyb:	výjimky
Dokumentace:	XML značky uvnitř komentářů uvozených třemi lomítky
Stav vývoje:	relativně nový, stále se vyvíjející jazyk, poslední stabilní verze vydaná v září 2019
Komunita:	široká komunita se spoustou diskusních fór i českém jazyce

Tab. 3: Podrobný popis programovacího jazyka C# .NET [45]

5.3.2 C++

Jazyk C++ je společně s Javou pravděpodobně nejpoužívanějším a v praxi nejžádanějším jazykem. Oproti C má velkou výhodu v objektovém paradigmatu, které je pro rozsáhlé projekty a pro recyklovatelnost kódů vhodnější. Jedná se však o velice náročný jazyk s řadou složitých konceptů, např. šablony. V jazyce C++ je vyžadována ruční správa paměti, proto na rozdíl od Javy a jiných jazyků zavádí pojem destruktory. Pro vývoj aplikace v rámci této práce je použití C++ nadbytečné. [45]

Autor, rok vzniku:	Bjarne Stroustrup, 1983
Paradigma:	multiparadigmatický: imperativní, strukturované (jako podmnožinu obsahuje jazyk C), objektové
Překládáný/interpretovaný	překládáný
Syntaktická rodina	C-like s objektovým rozšířením
Platforma	multiplatformní ve smyslu dostupných překladačů pro různé platformy
Licence:	komerční (MS Visual C++ Compiler, Borland C++) i open source implementace (součást GCC)
Efektivita:	vhodný i na rozsáhlé projekty; nižší efektivita učení dána složitými koncepty a velkým množstvím syntaktických pravidel
Datové typy:	běžné z C, navíc boolean, testové řetězce(string), datové proudy, složité typy standardní knihovny (např. zásobník, fronta, vektor, množina, mapa...)
Programové konstrukce:	běžné jako v C, navíc objekty, vícenásobná dědičnost, konstruktory i destruktory, virtuální metody, inline funkce, přetěžování funkcí i operátorů, výjimky, šablony
Výukové materiály:	velké množství učebnic a článků na internetu
IDE:	MS Visual Studio, Dev-C++, Code::Blocks, Netbeans a další
Rozšiřitelnost:	řada knihoven a frameworků (ovšem také často proprietární nebo špatně dokumentované)
GUI:	pomocí externích knihoven (WinAPI, GTK, Qt, wxWidgets a další)
Použití v praxi:	velmi oblíbený pro aplikační software, hry
Open-Source projekty:	řada i velkých open source projektů
Zpracování chyb:	podporuje výjimky
Dokumentace:	pouze externě, například program Doxygen
Stav vývoje:	nový ISO/IEC 14882:2017 (1. prosince 2017)
Komunita:	řada aktivních profesionálních i amatérských diskusních fór

Tab. 4: Podrobný popis programovacího jazyka C++ [45]

5.3.3 JAVASCRIPT

JavaScript lze označit za relativně kontroverzní jazyk. Jeho vývoj je vázaný na vývoj webových prohlížečů a jejich implementaci, což může v určitých případech přinášet značné problémy se vzájemnou kompatibilitou. I když je využíván převážně

v internetových aplikacích, lze jej využít pro psaní scriptů i v aplikacích jiných. Například Unity 3D jej značně podporovalo v svých starších verzích, avšak s postupem času se od tohoto jazyka, stejně jako jiná vývojová studia, distancovalo. Pro vývoj aplikace v rámci této práce lze jazyk JavaScript považovat za použitelný. [45]

Autor, rok vzniku:	Brendan Eich, 1995
Paradigma:	strukturované, částečně objektové, událostmi řízené
Překládaný/interpretovaný	interpretovaný na straně internetového prohlížeče
Syntaktická rodina	<i>C-like</i>
Platforma	multiplatformní, ale komplikovaně přenositelný mezi prohlížeči
Efektivita:	nízká
Datové typy:	používá dynamické a slabé typování, nelze tedy mluvit přímo o datových typech
Programové konstrukce:	běžné podmínky a cykly, funkce, včetně anonymních funkcí, zjednodušený koncept objektů (v zásadě jde o pole, která mohou jako své položky obsahovat funkce), výjimky
Výukové materiály:	menší množství knih, i elektronické literatury
IDE:	libovolný textový editor
Rozšiřitelnost:	minimální: různé JavaScript frameworky a knihovny
GUI:	obsahuje funkce pro volání dialogových oken, případně GUI tvořené prvky webové stránky (knihovny jako ExtJS, Dojo, Scriptaculous)
Použití v praxi:	oblíbený pro tvorbu webových aplikací a webového GUI, důležitý pro HTML 5
Open-Source projekty:	málo
Zpracování chyb:	výjimky
Dokumentace:	v komentářích, nicméně kvůli komprimaci skriptů pro přenos do prohlížeče se často odstraňuje
Stav vývoje:	vývoj probíhá neustále v závislosti na webových prohlížečích
Komunita:	spíše menší

Tab. 5: Podrobný popis programovacího jazyka JavaScript [45]

5.3.4 PYTHON

Python je vysokoúrovňový skriptovací programovací jazyk, který nabízí dynamickou kontrolu datových typů a různá paradigmat, zejména objektově orientované. Systém je vyvíjen jako open source a jeho použití je úzce spojeno s Linuxovou distribucí. Python zcela určitě lze využít pro vývoj aplikace spojený s touto prací.

Autor, rok vzniku:	Guido van Rossum, 1991
Paradigma:	multiparadigmatický: strukturovaný i objektový s funkcionálními prvky
Překládáný/interpretovaný	interpretovaný
Syntaktická rodina	vlastní, používá zarovnání mezerami k určení bloku kódu
Platforma	multiplatformní
Licence:	Python Software Foundation Licence, kompatibilní s GNU GPL(open source), bez copyleftu
Efektivita:	Nižší (interpretovaný jazyk)
Datové typy:	dynamické a silné typování; datový typ nenáleží jménu proměnné, ale uložené hodnotě; zná celá čísla, dlouhá celá čísla (omezená jen velikostí paměti), reálná (racionální) a komplexní čísla, dále řetězce (používá Unicode), n-tice (heterogenní pole s pevnou délkou a obsahem, seznamy (heterogenní dynamické pole) a slovníky (asociativní pole, hash), boolean
Programové konstrukce:	podmínky if-else doplněné o větev elif (alternativní podmínka místo podmínky, varianta switch-case neexistuje), cyklus while a for, anonymní lambda funkce, datové proudy, objekty (bez řízení přístupu, tj. neexistuje private/protected/public), vícenásobná dědičnost, konstruktor, destruktory, metody jsou v roli atributu s funkcí jakožto přiřazenou hodnotou, výjimky
Výukové materiály:	řada učebnic a článků na internetu (i v češtině)
IDE:	PyDev (Eclipse plugin), Netbeans, Code:Blocks, textové editory a jiné
Rozšiřitelnost:	moduly (import)
GUI:	PyGTK, PyQt, PySWT, WxPython (wxWidgets), Win32...
Použití v praxi:	široce používaný, zejména v unixovém prostředí, také na webové technologie
Open-Source projekty:	dostupné

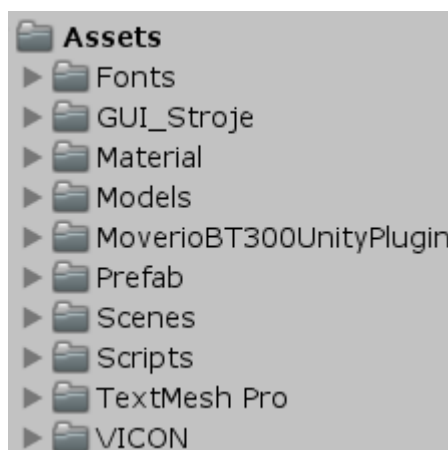
Zpracování chyb:	výjimky, DocTest balíček pro testování
Dokumentace:	pouze komentáře, nebo externí dokumentační projekt Doxygen
Stav vývoje:	vyvíjí se
Komunita:	poměrně velká

Tab. 6: Podrobný popis programovacího jazyka Python [45]

6 VLASTNÍ ŘEŠENÍ

Výběr vhodného frameworku vychází z vyhodnocení řešerše vývojových prostředí probíraných v předcházející kapitole. Nejdůležitějším kritériem výběru bylo, jaké prostředí je nejvhodnější pro vývoj aplikace pro užívaný headset MOVERIO. Vybrán byl engine UNITY, jelikož disponuje volně přístupnými assety pro komunikaci s tímto headsetem. Od této volby se odvíjí i výběr operačního systému. UNITY zatím nemá plnou podporu linuxových systémů, a proto byl využíván operační systém Windows 10. Kvůli snaze vytvořit aplikace za pomoci nejnovějších nástrojů, byla použita verze Unity 2018.4.16f1 (64-bit). Jako programovací jazyk byl zvolen C#.

Program je tvořený celou řadou assetů, počínaje těmi nejzákladnějšími – 3D modely a fonty, až po ty nejsložitější – plugin pro headset MOVERIO. Na obrázku č. 38 lze vidět jejich seznam tvořící hrubou strukturu programu.



Obr. 38: Seznam assetů tvořící základní strukturu programu

6.1 MODELOVÁNÍ VIRTUÁLNÍ REALITY V UNITY 3D

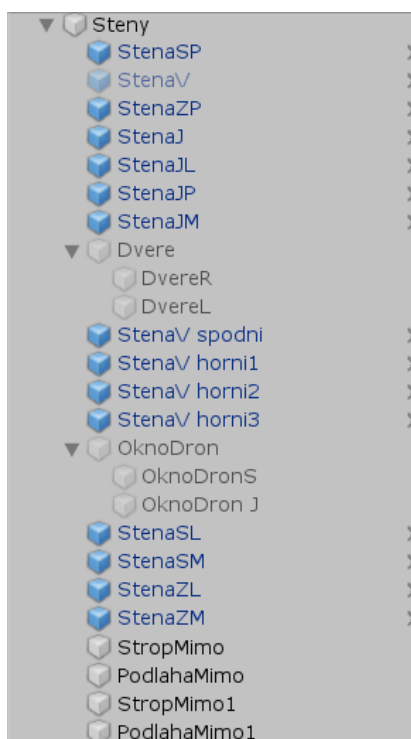
Z počátku bylo třeba zvolit vhodný postup k vytvoření umělé scény. Protože UNITY má značně omezené nástroje pro modelování, bylo také nutné zvážit využití dostupných assetů, nebo jiného modelovacího nástroje typu Blender. V první řadě šlo o vymodelování výrobní haly. Zde bylo potřeba vytvořit podlahu, strop, stěny. Jelikož se jedná vesměs o základní geometrické tvary, použití nástrojů UNITY bylo pro tuto tvorbu dostačující. Ve druhé fázi se vytvářely statické předměty. Zde se jednalo o výrobní linku, heliport a odložené bedny v továrně. I to jsou předměty, pro které není nutné využívat jiné modelovací prostředí. Třetí fáze měla za cíl vytvořit pohybující se objekty. A to dveře, okna, bedny na výrobní lince a dron. Pro první tři opět bohatě stačilo vývojové prostředí UNITY, dron byl však příliš komplikovaný a tak se zhotovil pomocí vývojového prostředí Blender. Tento model však nebyl v pozdější fázi skriptování příliš kompatibilní s ostatním prostředím, proto byl

zjednodušen a opětovně vytvořen, tentokrát v UNITY. Čtvrtá fáze byla nahrání kosmetických předmětů, které byly staženy z volně dostupných zdrojů [46]. Poslední fáze se soustředila na vytvoření osvětlení prostor.

6.1.1 ZÁKLADNÍ PROSTORY

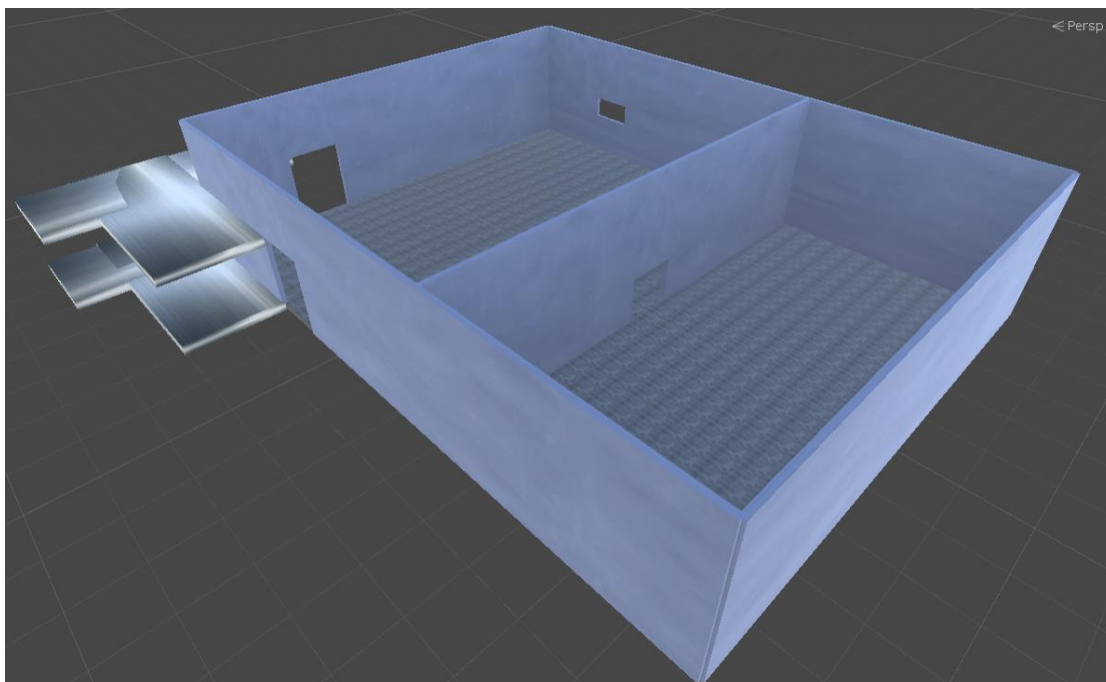
Při vytváření základních prostor bylo důležité zamyslet se nad měřítkem tak, aby co nejvíce odpovídalo reálným rozměrům výroby. 10 bodů stupnice v UNITY se tedy rovnalo hodnotě 2,5 metru ve skutečnosti. Rozměry pro celý objekt byly nastaveny v měřítku 130 b (32,5 m) na délku, 100 b (25 m) na šířku a 30 b (7,5 m) do výšky.

Největším úskalím při tvorbě nosných stěn byla práce s objekty samotnými. Jelikož UNITY nepodporuje jinou úpravu objektů než změnu jejich rozměrů, byla značně zkomplikována tvorba otvorů pro dveře, okna a výrobní linku. Zprvu složité řešení, kde bylo vytvořeno mnoho dílčích částí, které se postupně skládaly dohromady, se ukázalo jako velice výhodné v pozdějších fázích projektu.



Obr. 39: Seznam objektů tvořící stěny

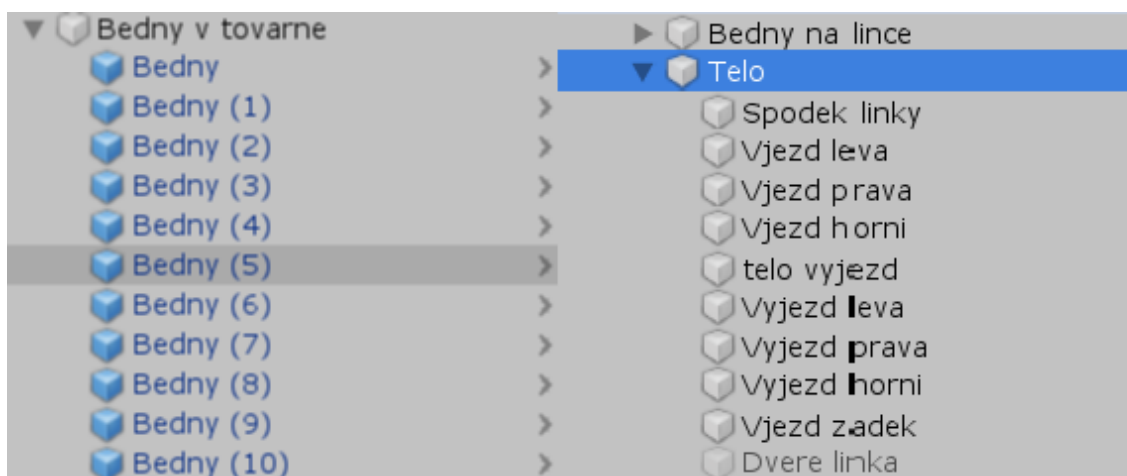
Na obr. č. 39 je zobrazen seznam objektů tvořících čtyři obvodové stěny a příčku. Jedná se o bloky s modrou kostkou vedle názvu. Tyto jsou odlišeny od ostatních, jelikož mají společný výchozí prefabrikát a také z důvodu snadnější manipulace a modifikace. Poslední čtyři bloky jsou součástí výrobní linky, proto nevychází z prefabrikátu pro stěny. Strop a podlaha jsou v nadřazeném souboru kvůli snadnější modifikaci a taktéž nemají společný základ se stěnami.



Obr. 40: Základní konstrukce výrobní haly (bez stropu) pro virtuální realitu

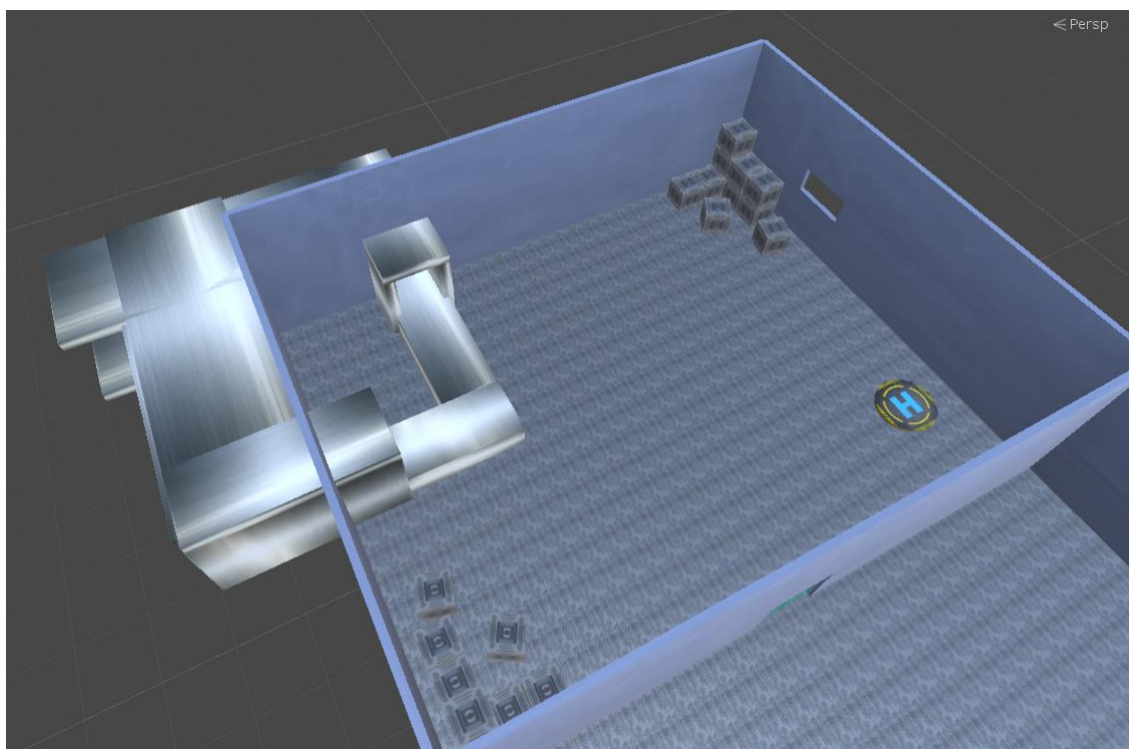
6.1.2 STATICKÉ PŘEDMĚTY

Statické předměty představují objekty, které vyplňují prostor továrny a budou mít v pozdější fázi vývoje přiděleny dynamické funkce. Samy o sobě se však pohybovat nebudou.



Obr. 41: Seznam prvků výrobní linky a beden v hale

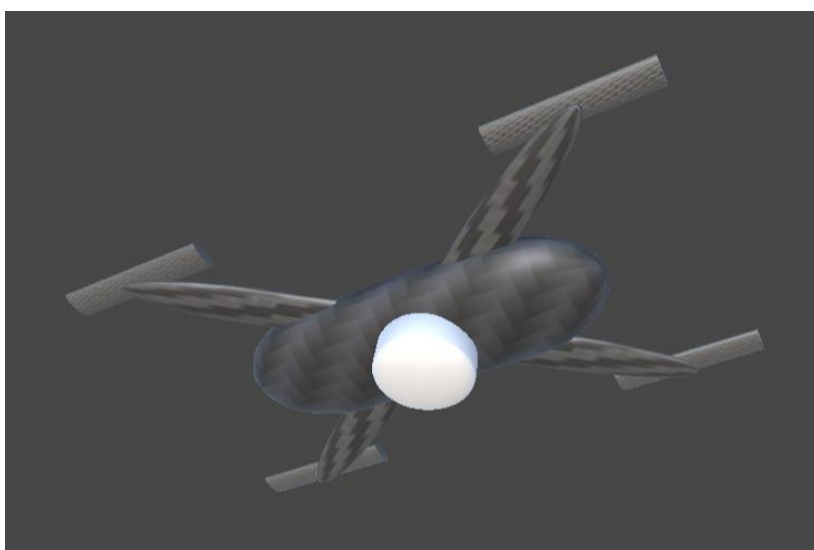
Stejně jako stěny, tak i bedny v hale jsou vytvořeny z prefabrikátu. Tělo linky však touto metou tvořeno není, kvůli pozdější manipulaci s dynamickými objekty. Heliport byl vybudován jako samostatný jednoduchý prvek a na seznamu není. Obrázek č. 42. zobrazuje halu po vytvoření statických objektů.



Obr. 42: Výrobní hala po nahrání statických předmětů

6.1.3 DYNAMICKÉ PŘEDMĚTY

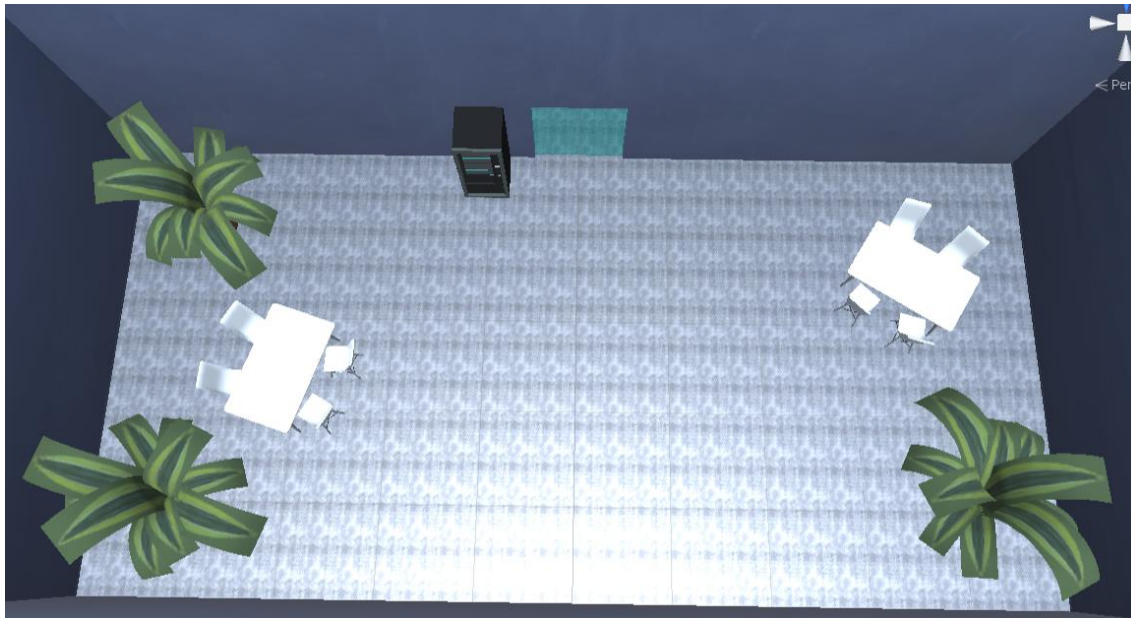
Pro pocit opravdového provozu a dokonalé simulace bylo potřeba vytvořit pohybující se předměty. Proto byly do scény přidány modely dronu, pohyblivých dveří a beden, které jsou generovány výrobní linkou. Model dronu byl formátován pomocí základních geometrických modelů, proto ve statické poloze nepůsobí zcela věrohodně. Pokud je však aplikace spuštěná a dron je v letu, působí velice autenticky.



Obr. 43: Model pozorovacího dronu s kamerou ve spodní části těla

6.1.4 KOSMETICKÉ PŘEDMĚTY

Pro navození atmosféry Průmyslu 4.0 a reálného provozu je před vchodem do výrobní haly vybudována odpočinková místnost. Zde se nacházejí převážně volně dostupné assety, které nebyly vytvořeny v rámci enginu UNITY.



Obr. 44: Náhled do odpočinkové místnosti

6.1.5 OSVĚTLENÍ

Nastavení správného osvětlení je velice důležité pro celkový vzhled aplikace. UNITY nabízí širokou škálu světelných assetů, ale také umožňuje tvorbu vlastního osvětlení. Zvolena byla kombinace světelných efektů. Jako hlavní zdroj světla je použito defaultních světelných nastavení UNITY, je však vypnuté standardní přímé světlo *Directional Light*, které osvětluje scénu.

Protož je scéna ze všech stran obklopena objekty, stěnami, bylo nutné vytvořit další světelné zdroje, aby se zvýšila viditelnost. Vnitřní osvětlení je tedy zhotoveno z objektu typu *capsule*, ke kterému se přidal materiál s nastaveným jasnem tak výrazným, že imituje zdroj světla. Dále je všem materiálům uvnitř místností nastavena obecná metoda static, která způsobuje odraz světla od objektů se zvýšeným jasnem. Díky tomu vznikla dobrá imitace průmyslových LED osvětlení. V pracovní části haly je světlo nastaveno modrobílé, pro zvýšení viditelnosti. Odpočinková část má světlo laděné více do teplých, žlutých barev.



Obr. 45: Ukázka žlutého světla v odpočinkové místnosti



Obr. 46: Ukázka modrého světla v provozní hale

6.2 SCRIPTOVÁNÍ

Aby aplikace plnila úlohu simulace reálného prostředí, bylo potřeba vytvořit soubor scriptů, které scénu rozpohybují. Nešlo však pouze o pohyb 3D modelů dříve vyhotovených, jednalo se také o vytvoření simulace operátora, jenž je schopná

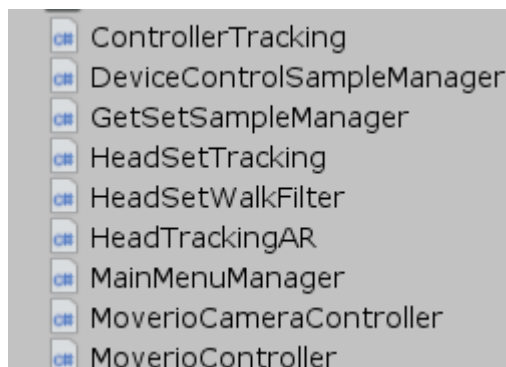
komunikovat s headsetem MOVERIO. Jako poslední byly vytvořeny scripty pro textové zobrazování stavu 3D objektů.

6.2.1 KOMUNIKACE

Teoretický předpoklad je ten, že kamerový systém zjistí na základě pozice operátora jeho polohu nebo polohu jiných těles v hale, vyšle souřadnice aplikaci a ta následně zobrazí v průhledových brýlích objekty rozšiřující scénu pro danou polohu.

Získání polohy operátora provádí kamerový systém, který dokáže podle správně umístěných markerů na headsetu určit přesnou pozici a natočení. Zpracování těchto dat je prováděno pomocí předpřipravené knihovny. Jedná se o soubor scriptů, jenž dokážou získaná data transformovat na souřadnice a poslat aplikaci. Přenos dat probíhá v transportní vrstvě pomocí protokolu UDP Server/Client. Dalším krokem je práce se získanými souřadnicemi přiřazenými jednotlivým objektům. Ty následně pomocí dalších scriptů reagují na tato data zobrazením doplňujících informací v průhledových brýlích.

Komunikace mezi vytvořenou aplikací a headsetem je dosaženo pomocí volně přístupného assetu *Moverio BT-300 Unity Plugin*, z UNITY Asset Store, kde se nachází velké množství scriptů pro ovládání kamery, displej a komunikace s UNITY aplikací.



Obr. 47: Seznam scriptů pro ovládání headsetu dostupných z assetu *Moverio BT-300 Unity Plugin*

6.2.2 OPERÁTOR

Pro vytvoření simulace virtuální reality testující aplikaci bez dat od kamerového systému a bez průhledových brýlí, bylo potřeba naprogramovat operátora a jeho pohyb. Protože byl systém testován na klasickém PC, byly pro ovládání vybrány hardwarové prvky myš a klávesnice.

Aby se operátor mohl vodorovně pohybovat a zároveň měl možnost rozhledu 360° horizontálně i vertikálně, bylo potřeba vytvoření složitější struktury. Jako první byl zhotoven rodičovský prázdný objekt Hráč, kterému byla přidána struktura *Character Controller*, a ta byla dále přiřazena scriptu Pohyb. Tento script se stará o vodorovný pohyb pomocí kláves W, A, S, D, nebo pomocí šipek na klávesnici. Je zde

také možnost nastavit rychlost pohybu ve virtuální realitě. Na obrázku č. 48 lze vidět defaultní nastavení kláves pro ovládání, které však je možné při zapnutí programu změnit.

Graphics	Input	
Control	Primary	Secondary
Horizontal (+)	right	d
Horizontal (-)	left	a
Vertical (+)	up	w
Vertical (-)	down	s

Obr. 48: Defaultní nastavení ovládání pro virtuální realitu

V druhém kroku se vytvořil potomek *Camera*, tvořený objektem *Camera* se strukturou *Rigidbody*. Potomek obsahuje i script *MouseLook* umožňující rozhled po okolí pomocí myši. Součástí scriptu jsou dvě veřejné proměnné. První je typu *float* pro nastavení senzitivity myši, druhá je typu *Transform*, které je přiřazen rodič Hráč. Celý komplet objektů je umístěn na jednu pozici do výšky 7,5 b a díky tomu je dosaženo pohledu z první osoby. Ukázky kódů na obrázku č. 49 a č. 50 zobrazují klíčovou metodu *Update()*, která je volána vždy právě jednou po každé změně *framu*, a má klíčovou úlohu při vykonávání scriptu.

```
void Update()
{
    float x = Input.GetAxis("Horizontal");
    float z = Input.GetAxis("Vertical");

    Vector3 move = transform.right * x + transform.forward * z;

    controller.Move(move * speed * Time.deltaTime);
}
```

Obr. 49: Metoda *Update()* ze scriptu Pohyb

```

void Update()
{
    float mouseX = Input.GetAxis("Mouse X") * mysSens * Time.deltaTime;
    float mouseY = Input.GetAxis("Mouse Y") * mysSens * Time.deltaTime;

    xRotation -= mouseY;
    xRotation = Mathf.Clamp(xRotation, -90f, 90f);

    transform.localRotation = Quaternion.Euler(xRotation, 0f, 0f);
    cameraHrac.Rotate(Vector3.up * mouseX);
}

```

Obr. 50: Metoda *Update()* ze scriptu *MouseLook*

6.2.3 DRON

Struktura dronu je složena z prázdného objektu, který představuje rodiče. Jako potomek je vytvořeno tělo, potomci potomka jsou pak ostatní části dronu včetně vrtulí. Pro ovládání rotace vrtulí slouží dva jednoduché scripty *RotaceL* a *RotaceP*. Třetí script *PohybWaypoint* slouží k pohybu dronu po místnosti. Jeho princip spočívá v tom, že se vytvoří n-rozměrné pole typu *Transform[]*, které se naplní objekty vytvořenými v UNITY a dron poté letí chronologicky na pozici těchto objektů. V této aplikaci je využito objektů typu *Empty*, aby nedocházelo ke kolizím. Dále se zde nastavuje rychlost letu.

```

void Update()
{
    if (transform.position != target[current].position)
    {
        Vector3 pos = Vector3.MoveTowards(transform.position, target[current].position,
            Time.deltaTime * speed);
        GetComponent<Rigidbody>().MovePosition(pos);
    }
    else current = (current + 1) % target.Length;
}

```

Obr. 51: Metoda *Update()* ze scriptu *PohybWaypoint*

Pomocí scriptu *Pohyb Waypoint* je ovládán i pohyb beden umístěných na výrobní lince.

6.2.4 DVEŘE

Otevírání dveří je ovládáno pomocí scriptu *DvereOpen*. Bylo zde třeba vytvořit několik proměnných ovládajících čas a rychlost otevírání či zavírání dveří. Dále se musely k objektům přiřadit *Collidery*, které detekovaly pomocí metod

OnTriggerEnter() a *OnTriggerExit()* přítomnost operátora. Tento script je přiřazen objektu Hráč.

```
private void Update()
{
    if (doorControl == true && dvereCasovacOtvirani >= 0)
    {
        if (dvereCasovacOtvirani == 0)
        {
            doorControl = false;
        }
        dvereCasovacOtvirani -= Time.deltaTime;
        DvereR.transform.Translate(Vector3.right * Time.deltaTime * rychlostOtevirani);
        DvereL.transform.Translate(Vector3.left * Time.deltaTime * rychlostOtevirani);
    }
    else if(doorControl == false && dvereCasovacZavirani >= 0)
    {
        dvereCasovacZavirani -= Time.deltaTime;
        DvereR.transform.Translate(Vector3.left * Time.deltaTime * rychlostOtevirani);
        DvereL.transform.Translate(Vector3.right * Time.deltaTime * rychlostOtevirani);
    }
}
```

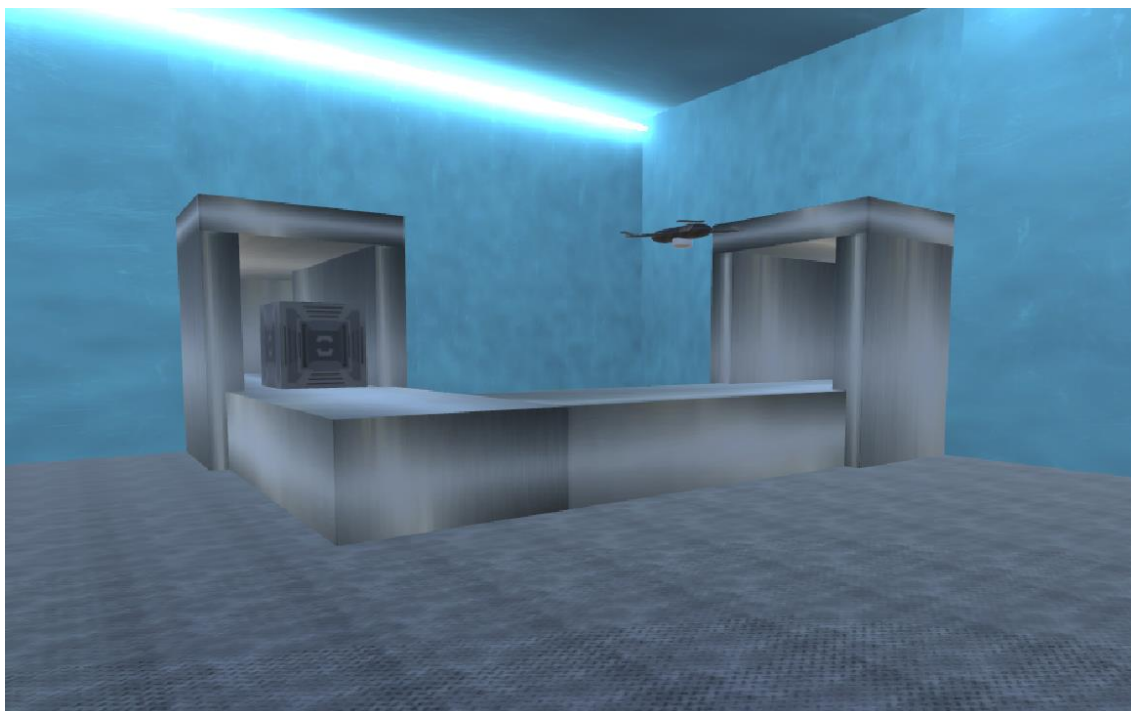
Obr. 52: Metoda *Update()* ze scriptu *DvereOpen*

6.3 ZOBRAZENÍ TEXTŮ A ZMĚNA OBJEKTŮ

Dynamické zobrazování textů o stavech strojů v provozu je hlavním účelem této aplikace jak pro virtuální, tak rozšířenou realitu. Řešení je navrženo tak, aby se dalo využít pro obě reality jen s malými změnami ve skriptech.

Každému objektu, který má nějakou funkci a je vhodné o něm informovat při pohybu halou, je přiřazen přibližně ve výšce očí objekt typu *Canvas*. Tento objekt tvoří funkci rodiče a jako potomek je do něj vložen jeden nebo více objektů typu *Text*. Aby došlo k zobrazení textu jen v přítomnosti operátora, byl ke každému objektu vytvořen spouštěcí prvek typu *Box Collider* nebo *Capsule Collider*. Při startu jsou tedy všechny texty vypnuté do té doby, než metoda *OnTriggerEnter()* detekuje polohu operátora v oblasti okolo aktivních objektů. O tuto detekci a identifikaci konkrétního objektu se starají scripty *TextTrigger*, které jsou součástí objektu *Camera*. V rámci těchto scriptů je také nastavena změna textury objektu, aby se graficky rozlišilo, ke kterému objektu je text přiřazen. Mimo to jsou zde také scripty *TextDynamic* dynamicky měnící text na základě prováděné operace.

Při pohybu operátora halou nebo při statickém pozorování letícího dronu či bedny na lince, je čitelnost textů omezená jen na určitý úhel. Tato problematika je vyřešena pomocí scriptu *TextRotace*, který umožňuje otáčení objektu *Canvas* tak, aby byl vždy přímo natočen na operátora a text byl tak dobře čitelný z každé jeho pozice.



Obr. 53: Pohled operátora před spuštěním scriptů TextTrigger



Obr. 54: Pohled operátora po spuštěním scriptů TextTrigger

Posledním nastavením zobrazení jsou texty fixované na pohled operátora. Tyto texty se nacházejí ve spodních rozích vizualizace a informují o pozici operátora, datu a čase.



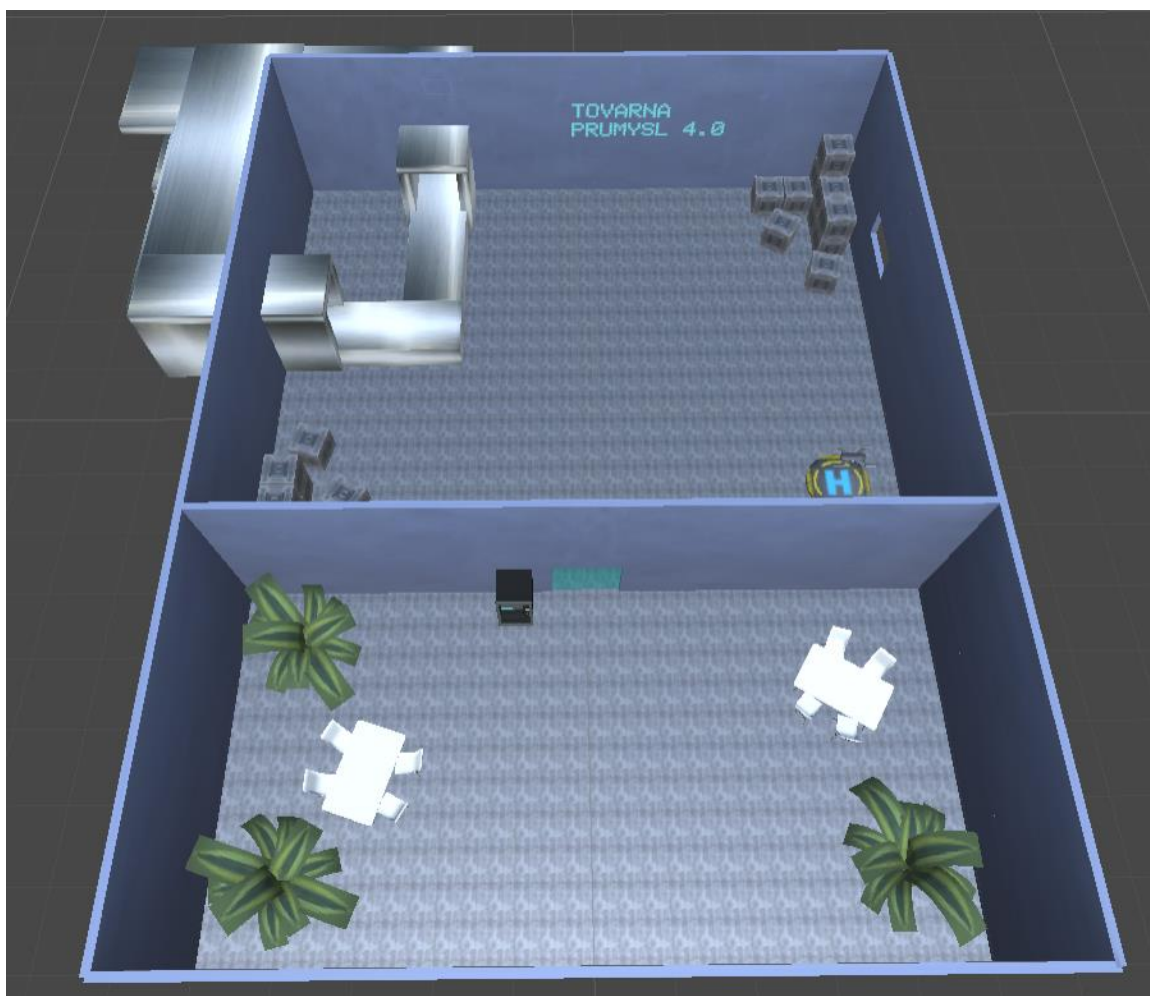
Obr. 55: Ukázka textů informujících o poloze, datu a čase

7 ZHODNOCENÍ VYTVOŘENÉ APLIKACE

Aplikace pro průhledové brýle rozšířené reality byla na základě důkladné rešerše vytvořena v rámci operačního systému Windows 10. Grafické rozhraní bylo zhotoveno pomocí herního engine UNITY 3D, pro psaní scriptů bylo použito vývojové prostředí Visual Studio 2019 a programovací jazyk C#. Vzhledem k faktu, že aplikaci z důvodu uzavřené laboratoře nebylo možné otestovat na reálném systému, byla vytvořena virtuální realita, která ztvárnila skutečnou výrobní halu.

Aplikace funguje jako simulátor pohybu operátora užívajícího průhledové brýle, který má možnost se volně pohybovat v tovární hale. Na základě tohoto pohybu se mu zobrazují informace o objektech, na něž je natočený. Objekty také při „očním“ kontaktu, spolu s informativním textem, mění svoji barvu tak, aby bylo rozlišeno, které části se daný text týká viz. obr. 53-54. Dále má operátor neustálé informace o čase a o své vlastní poloze.

Při tvorbě aplikace se podařilo vyhovět všem požadavkům zadání, kromě otestování nastavitelné lokalizační chyby, kterou se nepovedlo nasimulovat ve virtuální realitě. Pro využití na reálném systému by bylo nutné ještě otestovat komunikaci s kamerovým systémem VICON a také přepočítat souřadný systém na reálné rozměry daného prostoru, které by poté využíval plugin pro headset MOVERIO.



Obr. 56: Náhled na všechny objekty v rámci aplikace pro virtuální realitu

8 ZÁVĚR

V diplomové práci byla vypracována rešerše technologií Průmyslu 4.0 s důrazem kladeným na rozšířenou realitu.

První část dokumentu podrobně rozebírá problematiku Průmyslu 4.0. Bylo zde popsáno, co si po tímto pojmem představit a jakými nejvýraznějšími technologickými nástroji disponuje. Kapitola obsahovala podrobný rozbor nástrojů typu digitální dvojče, aditivní výroba, kybernetika a umělá inteligence. V druhé části byly zkoumány různé technologické varianty vnímání reality. U každé ze zkoumaných realit byly představeny headsety pro jejich dosažení, které v posledních letech dominují trhu. A to HTC Vive, Oculus Rift, MOVERIO EPSON, Google GLASS a Microsoft Hololens.

Práce se ve své další části zaměřuje na zkoumání možností technologie motion capture, konkrétně na zařízení VICON, jenž se nachází v laboratoři Průmyslu 4.0 na VUT. V souvislosti s těmito systémy je rozebrána pasivní triangulace. Dále je na systému OptiTrack podrobně zanalyzováno, jak kamery motion capture fungují a jaké jsou možnosti jejich využití. Následuje rešerše operačních systémů, vývojových prostředí a programovacích jazyků, na jejímž základu je vybrán ideální framework pro tvorbu aplikace pro průhledové brýle.

Jak vyplývá z teoretické analýzy, pro tvorbu aplikací rozšířené a virtuální reality je možné využít řadu vývojových prostředí. Je to dáno tím, že rozšířená realita a celkově nástroje Průmyslu 4.0 jsou téma současnosti i blízké budoucnosti. Velká řada společností vyvíjejících herní enginy nebo headsety se snaží tvorbu programů zjednodušit a zpřístupnit je i pro vývojáře s minimálním rozpočtem. Proto i aplikace v rámci této diplomové práce mohla být vyvíjena zdarma v profesionálním vývojovém prostředí.

Projekt rozšířené reality pro průhledové brýle byl velice rozsáhlý, zejména po stránce výběru vhodného softwaru umožňujícího aplikaci jednoduše vytvořit a návrhu struktury programu využitelného v praktickém životě. Výsledný program bohužel z důvodů dlouhodobého uzavření školních laboratoří nebylo možné testovat na reálných systémech, avšak dosažené výsledky jsou pomocí simulace ve virtuální realitě až na malé nedostatky velice uspokojivé. Tato práce by tak mohla v budoucnu sloužit jako základ tvorby aplikace pro využití v reálných provozech firem, které se touto problematikou zabývají. Možností je celá řada a je jen otázkou času, kdy bude rozšířená realita nejen součástí každodenního provozu v průmyslu, ale také v běžném životě lidí.

LITERATURA

- [1] What is Virtual Reality?. *Virtual Reality* [online]. London: Virtual Reality Society, c2017 [cit. 2018-11-08]. Dostupné z: <https://www.vrs.org.uk/virtual-reality/what-is-virtual-reality.html>
- [2] What is virtual indentity?. In: *Webopedia definition* [online]. Foster City: QuinStreet, c2018 [cit. 2018-11-09]. Dostupné z: https://www.webopedia.com/TERM/V/virtual_identity.html
- [3] Cluch VR. In: *VRFocus* [online]. London: Gibbons, 2015 [cit. 2018-11-22]. Dostupné z: <https://www.vrfocus.com/2015/03/clutch-vr-available-oculus-vr-share/>
- [4] Virtuální realita - Wikisofia. *Wikisofia* [online]. 2018 [cit. 2018-11-09]. Dostupné z: https://wikisofia.cz/index.php?title=Virtu%C3%A1ln%C3%AD_realita&oldid=51860
- [5] *VIVE Pro The Professional-grade VR headset* [online]. Washigton: HTC, c2011-2018 [cit. 2018-11-22]. Dostupné z: <https://www.vive.com/us/product/vive-pro/>
- [6] *Oculus* [online]. Menlo Park: Facebook Technologies, 2016 [cit. 2018-11-22]. Dostupné z: <https://www.oculus.com/>
- [7] Oculus Rift...Alza.cz. In: *Alza.cz* [online]. Praha: Alza.cz, 2016 [cit. 2018-11-22]. Dostupné z: <https://www.alza.cz/gaming/oculus-rift-oculus-touch-d5104479.htm>
- [8] Augmented reality. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001-, 2018 [cit. 2018-12-14]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Augmented_reality
- [9] Top 5 Development Tools for Augmented Reality. In: *TOP IT Firms* [online]. IT Firms, c2015-2017, 4 July 2017 [cit. 2018-12-14]. Dostupné z: <https://www.itfirms.co/top-5-development-tools-for-augmented-reality>
- [10] FETTKE, Peter, Lasi HEINER a HG KEMPER. Industry 4.0. *Business & Information Systems Engineering* [online]. 2014, 2014(6), 239-242 [cit. 2018-12-15]. Dostupné z: <https://doi-org.ezproxy.lib.vutbr.cz/10.1007/s12599-014-0334-4>
- [11] TICHÝ, Jan. *SYSTÉMY MES/MOM V PROSTŘEDÍ INDUSTRY 4.0*. Brno, 2017. Diplomová práce. VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ. Vedoucí práce Jan Pásek
- [12] What is the Internet of Things? Internet of Things definitions. In: *I-SCOOP* [online]. Brusel: i-SCOOP, c2016-2018 [cit. 2018-12-15]. Dostupné z: <https://www.i-scoop.eu/internet-of-things/>
- [13] KŮT, Petr. *IMPLEMENTACE KONCEPTU PRŮMYSLU 4.0 V PODMÍNKÁCH ČESKÉ REPUBLIKY V NADCHÁZEJÍCÍM OBDOBÍ 2018-2038*. Praha, 2017. Diplomová práce. Národohospodářská fakulta VŠE. Vedoucí práce Magdalena Kotýnková.
- [14] INICIATIVA PRŮMYSL 4.0. In: *Ministerstvo průmyslu a obchodu* [online]. Praha: Ministerstvo průmyslu a obchodu, c2005-2018 [cit. 2018-12-20]. Dostupné z: <https://www.mpo.cz/assets/dokumenty/53723/64358/658713/priloha001.pdf>
- [15] Trends Emerge in the Gartner Hype Cycle for Emerging Technologies, 2018. In: <https://www.gartner.com/en> [online]. Stamford: Gartener, 2018 [cit. 2018-12-20]. Dostupné z: <https://www.gartner.com/smarterwithgartner/5-trends-emerge-in-gartner-hype-cycle-for-emerging-technologies-2018/>

- [16] Optické metody měření 3D objektů. *Http://www.elektrorevue.cz/* [online]. Brno: ISES, c2013 [cit. 2018-12-21]. Dostupné z: <http://www.elektrorevue.cz/clanky/05023/index.html#kap2.1.1>
- [17] Build My Motion Capture System. *Motion Capture System VICON* [online]. Oxford: Vicon Motion Systems Limited, c2018 [cit. 2018-12-21]. Dostupné z: <https://www.vicon.com/visualization>
- [18] EPSON [online]. Amsterdam: Seiko Epson, c2018 [cit. 2018-12-25]. Dostupné z: <https://www.epson.cz/>
- [19] Glass. X - *The Moonshot Factory* [online]. Mountain View: X DEVELOPMENT, c2018 [cit. 2018-12-25]. Dostupné z: <https://www.x.company/glass/>
- [20] POHL, Ondřej. Co se vlastně stalo s Google Glass?. In: *Https://mobilenet.cz* [online]. Praha: 24net, c2018 [cit. 2018-12-25]. Dostupné z: <https://mobilenet.cz/clanky/co-se-vlastne-stalo-s-google-glass-35517>
- [21] Na nás všechny se řítí nove reality. In: *Https://technet.idnes.cz/* [online]. Praha: MAFRA, c1999-2018 [cit. 2018-12-26]. Dostupné z: https://technet.idnes.cz/virtualni-rozsirena-mixovana-realita-a-volumetric-video-pzm-/software.aspx?c=A170907_122621_software_vse
- [22] HoloLens hardware details. *Microsoft - Official Home Page* [online]. Redmond: Microsoft, c2018 [cit. 2018-12-26]. Dostupné z: <https://docs.microsoft.com/en-us/windows/mixed-reality/hololens-hardware-details>
- [23] Processes. In: *MDPI Publisher of Open Access Journals* [online]. Basilej: MDPI, c1996-2018 [cit. 2018-12-26]. Dostupné z: <https://www.mdpi.com/2227-9717/5/3/35>
- [24] Mobile Robots Cooperate to 3D Print Large Structures. In: *IEEE Spectrum: Technology, Engineering, and Science News* [online]. Piscataway: IEEE Spectrum, c2018 [cit. 2018-12-26]. Dostupné z: <https://spectrum.ieee.org/autoton/robotics/industrial-robots/mobile-robots-cooperate-to-3d-print-structures>
- [25] Industry 4.0 at Seat. In: *Automobilsport.com* [online]. Lenningen: NEW LINE asbl, c2001-2017 [cit. 2018-12-26]. Dostupné z: <https://www.automobilsport.com/industry-4-0-seat-daily-routine-autonomous-robots---171398.html>
- [26] Digitální dvojče Idustry fórum SIEMENS. In: *SIEMENS Česká republika* [online]. Praha: SIEMENS, c1996-2018 [cit. 2018-12-30]. Dostupné z: <https://www.siemens.cz/industryforum/digitalni-dvojce>
- [27] What data does a 'digital twin' run on?. In: *Internet of Business* [online]. Winchester: Vinelake, c2018 [cit. 2018-12-30]. Dostupné z: <https://internetofbusiness.com/data-digital-twin/>
- [28] VirtualrealityPrime13_12-450h.png. In: *OptiTrack - Motion Capture System* [online]. Corvallis: NaturalPoint, c2020 [cit. 2020-05-25]. Dostupné z: https://optitrack.com/public/images/virtualrealityPrime13_12-450h.png
- [29] General FAQs. In: *OptiTrack - Motion Capture System* [online]. Corvallis: NaturalPoint, c2020 [cit. 2020-05-25]. Dostupné z: <https://www.optitrack.com/support/faq/general.html>
- [30] X-base Marker - 14 mm. In: *OptiTrack - Motion Capture System* [online]. Corvallis: NaturalPoint, c2020 [cit. 2020-05-25]. Dostupné z: <https://www.optitrack.com/products/motion-capture-markers/#mcp1220>

- [31] Sprinter.png. In: *OptiTrack - Motion Capture System* [online]. Corvallis: NaturalPoint, c2020 [cit. 2020-05-25]. Dostupné z: <https://optitrack.com/public/images/sprinter.png>
- [32] OptiTrack Newsletter: Januray 2009. In: *OptiTrack - Motion Capture System* [online]. Corvallis: NaturalPoint, c2020 [cit. 2020-05-25]. Dostupné z: <https://optitrack.com/public/newsletters/2009-01.html>
- [33] What is Shutter Speed. In: *CreativeLive: Free Live Online Classes* [online]. San Francisco: CreativeLive, c2020 [cit. 2020-05-25]. Dostupné z: <https://www.creativelive.com/photography-guides/what-is-shutter-speed>
- [34] Motive-interface. In: *OptiTrack - Motion Capture System* [online]. Corvallis: NaturalPoint, c2020 [cit. 2020-05-25]. Dostupné z: <https://www.optitrack.com/public/images/motive-interface.jpg>
- [35] OptiTrack NatNet SDK - Stream. In: *OptiTrack - Motion Capture System* [online]. Corvallis: NaturalPoint, c2020 [cit. 2020-05-25]. Dostupné z: <https://optitrack.com/products/natnet-sdk/>
- [36] OptiTrack - Build Your Own Motion Capture System. In: *OptiTrack - Motion Capture System* [online]. Corvallis: NaturalPoint, c2020 [cit. 2020-05-25]. Dostupné z: <https://optitrack.com/systems/>
- [37] Windows 10. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2020 [cit. 2020-05-25]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Windows_10#Minim%C3%A1ln%C3%AD_po%C5%BEdavky
- [38] [Jak zkontrolovat specifikace ...]. In: *Https://www.microsoft.com/cs-cz/windows/windows-10-specifications* [online]. Redmond: Microsoft, c2020 [cit. 2020-05-25]. Dostupné z: <https://www.microsoft.com/cs-cz/windows/windows-10-specifications>
- [39] KRUTÁK, Tomáš. *Návrh a realizace interaktivního grafického rozhraní pro komunikaci s robotickým konvojem*. Brno, 2017. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojíního inženýrství. Vedoucí práce Doc. Ing. Stanislav Věchet, Ph.D.
- [40] [How do I find out ...]. In: *Ask Ubuntu* [online]. New York City: Stack Exchange, c2020 [cit. 2020-05-25]. Dostupné z: <https://askubuntu.com/questions/206407/how-do-i-find-out-which-version-and-derivative-of-ubuntu-is-right-for-my-hardwar>
- [41] KOVÁŘÍK, Stanislav. *Vývoj 3D hry ve frameworku Unity*. Praha, 2017. Bakalářská práce. Vysoká škola ekonomická v Praze Fakulta informatiky a statistiky. Vedoucí práce Ing. Jan Ženíšek.
- [42] Powerful 2D, 3D, VR & AR software ... *Unity Real Time Development platform* [online]. Kodaň: Unity Technologies, c2020 [cit. 2020-05-25]. Dostupné z: <https://store.unity.com/>
- [43] Top 5 Herních enginů. In: *GamesDev.cz* [online]. GamesDev.cz, c2018 [cit. 2020-05-25]. Dostupné z: <https://gamesdev.cz/top-5-hernich-enginu-pro-indie-vyvojare/>
- [44] Making of Sandex, the Cryengine. In: *Home Codemotion* [online]. Řím: Codemotion, 2019 [cit. 2020-05-25]. Dostupné z: <https://www.codemotion.com/magazine/dev-hub/gamedev/making-of-sandex-the-cryengine-game-editor/>
- [45] RÝDLO, Lukáš. *Programovací jazyky pro výuku programování na SS*. Brno, 2012. Diplomová práce. MASARYKOVA UNIVERZITA FAKULTA INFORMATIKY. Vedoucí práce Doc. RNDr. Tomáš Pitner, Ph.D.

- [46] *3D models for Free* [online]. New Orleans: Free3D, 2015 [cit. 2020-05-25]. Dostupné z: <https://free3d.com/>

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha 1 – Spustitelný soubor a zdrojové kódy jsou uloženy na přiloženém CD